



Universidad Nacional de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente
CIEMA-UNI

**COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO
FILTER PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON
CONCENTRACIONES ENTRE 80 µg/L - 100 µg/L, EN LA
COMUNIDAD MINA LA INDIA.**

Tesis sometida a la consideración del Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente para optar al título de Maestro en Ingeniería Ambiental.

Tesista: Ing. Ariel Aragón González.

Tutor: Msc. Lic. Rodolfo Manuel Jaenz Serrano.

Asesor: Msc. Ing. Edouard Jacotin.

Managua, Nicaragua.

Mayo de 2011.

DEDICATORIA.

Dedico este trabajo a mi familia:

Ivette Reyes Flores, mi esposa

Ariette Sofía, Marcos Ariel y Henry José, mis hijos

Quienes son la razón de todos mis esfuerzos para superarme.

También se lo dedico a Elvira Aragón, mi madre.

AGRADECIMIENTOS.

Doy gracias a Dios por sus bendiciones que me permitieron hacer realidad este sueño.

Agradezco a Don Miguel Reyes y a Don Carlos Rivas por el apoyo desinteresado para la obtención de la beca de estudio.

Agradezco al Ingeniero Sergio Gámez y Licenciado Rodolfo Jaén del CIEMA-UNI por contribuir positivamente en el trayecto.

Al Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), por financiar el presente trabajo de investigación.

Agradezco a Doña Betty y Don Oscar por su apoyo invaluable.

CARTA SOLICITUD DE APROBACION DE PROTOCOLO.

Managua, Nicaragua
16 de febrero del 2009

Ingeniero
Eduard Jacotin
Coordinador Maestría Ingeniería Ambiental
UNI / CIEMA
Sus Manos

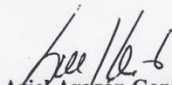
Estimado Ingeniero Jacotin:

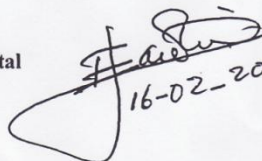
Por medio de la presente someto a aprobación de la UNI / CIEMA el Protocolo de Tesis para optar al Título de Maestro en Ingeniería Ambiental el cual tiene el nombre de "Comportamiento de tecnología KANCHAN Y ZONO FILTERS para la remoción de arsénico con concentraciones de 80-100 $\mu\text{g/l}$, en la Comunidad Mina la India". Para que de esta manera poder iniciar el proceso de implementación de dicho estudio y cumplir con las exigencias académicas estipuladas en el reglamento de Maestría.

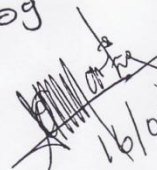
Para llevar a cabo el presente estudio estoy proponiendo la Tutoría del Msc. Rodolfo Jaén Serrano y el Asesoramiento del Msc. Eduardo Jacotin, por lo que también solicito su aprobación.

Esperando una repuesta pronta al respecto.

Atentamente,


Ariel Aragón González
Estudiante Maestría Ingeniería Ambiental
Ciclo Académico 2004-2005


16-02-2009


16/02/09

Cc. Sergio Gamez
Sagrario Espinal
Rodolfo Jaenz
Archivo

Director UNI-CIEMA
Secretaria Académica
Profesor de Maestría Ingeniería Ambiental

CARTA APROBACION DE PROTOCOLO.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente
CIEMA-UNI



Managua, 23 de Abril de 2009

Ing. Ariel Aragón Gonzáles.
Egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental

Estimado Ing. Aragón

Acusamos recepción del protocolo de tesis metodológicamente revisado y aprobado.

En base a acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA en donde se analizó y aprobó la última revisión efectuada por el comité científico escogido y convocado por el mencionado Consejo. Conforme al Título III. Art. 10 del Reglamento Académico referente a los derechos de elaboraciones de tesis y Título III. Art. 11 del Reglamento de Culminación de Estudios de las Maestrías referente a los pasos a seguir para ser aceptado un protocolo de tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental (MIA), se hace constar que el contenido de dicho protocolo titulado **"Comportamiento de Tecnología KAMCHAN Y SONO FILTERS para la remoción de Arsénico con concentraciones de 80-100 μ /l, en la comunidad Mina la India,"** ofrece calidad y criterios coherentes al objetivo del mismo tema, para ser desarrollado, como tesis que le habilitará a optar, una vez elaborado, revisada y defendida, al grado de Magíster en Ingeniería Ambiental.

En base a la misma Acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA se acordó que el tutor idóneo para acompañarle en la elaboración de dicha tesis será el MSc. Rodolfo Jaén Serrano.

Sin más a que referirme me despido de usted.

Atentamente,


MSc. Edouard Jacotin
Coordinador M.I.A.



C/c. MSc. Sergio Gámez
MSc. Rodolfo Jaén
MSc. Sagrario Espinal
Archivo

Director CIEMA
Tutor de la tesis
Secretaría Académica CIEMA

*Recibido
29/04/09
9:00am*

Autor: Ariel Aragón Gonzáles.

CARTA AVAL PROTOCOLO DE TUTOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente
CIEMA-UNI



Managua, 23 de Abril de 2009

Ing. Ariel Aragón Gonzáles.
Egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental

Estimado Ing. Aragón

Acusamos recepción del protocolo de tesis metodológicamente revisado y aprobado.

En base a acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA en donde se analizó y aprobó la última revisión efectuada por el comité científico escogido y convocado por el mencionado Consejo. Conforme al Título III. Art. 10 del Reglamento Académico referente a los derechos de elaboración de tesis y Título III. Art. 11 del Reglamento de Culminación de Estudios de las Maestrías referente a los pasos a seguir para ser aceptado un protocolo de tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental (MIA), se hace constar que el contenido de dicho protocolo titulado **"Comportamiento de Tecnología KAMCHAN Y SONO FILTERS para la remoción de Arsénico con concentraciones de 80-100 µ/l, en la comunidad Mina la India,"** ofrece calidad y criterios coherentes al objetivo del mismo tema, para ser desarrollado, como tesis que le habilitará a optar, una vez elaborado, revisada y defendida, al grado de Magíster en Ingeniería Ambiental.

En base a la misma Acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA se acordó que el tutor idóneo para acompañarle en la elaboración de dicha tesis será el MSc. Rodolfo Jaén Serrano.

Sin más a que referirme me despido de usted.

Atentamente,


MSc. Edouard Jacotin
Coordinador M.I.A.

C/c. MSc. Sergio Gámez
MSc. Rodolfo Jaén
MSc. Sagrario Espinal
Archivo

Director CIEMA
Tutor de la tesis
Secretaría Académica CIEMA

*Recibido
29/04/09
9.00am*

Autor: Ariel Aragón Gonzáles.

CARTA AVAL TESIS Y SOLICITUD DE JURADO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
UNI
CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
CIEMA-UNI



Managua, 16 de Marzo de 2010

Ing. Edouard Jacotin
Coordinador Maestría en Ingeniería Ambiental – CIEMA-UNI

Estimado hermano Jacotin

Después de haber recibido los informes de Tesis: Denominadas Comportamientos de Tecnología Kanchan y Sono Filter para la remoción de Arsénico en agua de pozo con concentraciones de 80 µg/L – 100 µg/L en La Comunidad Mina La India, del Municipio de Santa Rosa del Peñón y Comportamiento de Tecnología Kanchan y Sono Filter para la remoción de Arsénico en agua de pozo con concentraciones de 60 µg/L – 80 µg/L en la Comunidad Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón, respectivamente. Los referidos Informes fueron presentados por los Tesisistas Ing. Ariel Aragón e Ing. Rolando Castillo. Procedí a revisarlos detenidamente, proporcionándoles las recomendaciones que consideré pertinentes, según mis conocimientos y experiencias en el Tema.

Les regresé los Informes con las recomendaciones correspondientes, día 8 de Marzo del año en curso, las cuales incorporaron y me enviaron nuevamente, los Informe, los revisé debidamente y pude corroborar que efectivamente habían considerados las sugerencias. Por lo tanto, doy mi aval para que nombren los miembros de jurados para que revisen las Tesis y brinden las recomendaciones que a bien consideren pertinentes en el tiempo establecido por el Reglamento de Defensa de Tesis, incorporación de las mismas por los Tesisistas y establecimiento de fecha de Defensa. .

Sin mas a que referirme aprovecho para saludarle y mostrarle mi gran cariño por la amistad que siempre nos ha unido.

Atentamente:

MSc. Lic. Rodolfo Manuel Jean Serrano
Tutor de Tesisistas

Cc.

MsC. Ing. Sergio Gámez Guerrero ; Director CIEMA – UNI

MSc. Lic. Sagrario Espinales; Secretaria Académica CIEMA - UNI

MsC.Lic. Lúa Toruño; Coordinadora Maestría en Ciencias Ambientales .

Archivo

I

NOMBRAMIENTO DE JURADO

Managua, 3 de agosto de 2010.

Ing. Ariel Aragón González
Egresado de la Maestría de Ingeniería Ambiental

Estimado Ing. Aragón

Por medio de la presente tengo a bien informarle que el Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente (CIEMA) ha nombrado el jurado para la defensa de tesis titulada "COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO FILTER PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON CONCENTRACIONES ENTRE 80µg/L-100µg/L, EN LA COMUNIDAD MINA LA INDIA" para optar al Título de Maestro en Ingeniería Ambiental que otorga la Universidad Nacional de Ingeniería.

El Jurado está conformado por las personas siguientes:

MSc. Miguel Balladares

MSc. Eduardo Ortiz

Dra. Teresa Rodríguez

Agradeciéndole de antemano la atención a la presente y deseándole éxitos. Me suscribo.

Atentamente



MSc. Edouard Jacotin

Coordinador de Maestría Ingeniería Ambiental

Cc/MSc. Sergio Gámez
MSc. Sagrario Espinal
Archivo

Director CIEMA
Secretaría Académica



Recibido el 5/8/2010



AVAL FINAL TESIS DE TUTOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios
Ambientales
(PIENSA-UNI)



Managua, 03 de Mayo de 2011

MSc. Ing. Yalena Navarro
Coordinadora Maestría en Ingeniería Ambiental
PIENSA - UNI

Su Despacho.-

Estimada MSc. Ing. Navarro

Me es grato dirigirme a usted, con el propósito de informarle que el egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental, Ing. Ariel Aragón González, ha incorporado las recomendaciones brindadas por los miembros del jurado examinador, previa revisión minuciosa de informe de tesis, denominada **COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO FILTER PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO CON CONCENTRACIONES ENTRE 80µg/L-100 µg/L, EN LA COMUNIDAD MINA LA INDIA.**

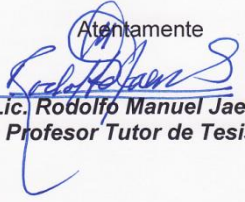
Como tutor, **doy fe de la incorporación de las recomendaciones y solicito que se proceda a la fijación de fecha de defensa, dentro del marco de tiempo establecido en el Reglamento de Culminación de Estudios de Maestrías.**

He de recordarle que el jurado examinador está constituido por los especialistas siguientes:

MSc. Ing. Miguel Balladares
Ing. Eduardo Ortiz
Dra. Teresa Rodríguez Altamirano

Sin mas a que referirme, aprovecho la oportunidad para saludarle y desearle éxitos en sus labores.

Atentamente


MSc. Lic. Rodolfo Manuel Jaen Serrano
Profesor Tutor de Tesista

Cc. MSc. Lic. Sagrario Espinal; Secretaria Académica PIENSA - UNI
Ing. Ariel Aragón González; optante al Título de Maestro en Ingeniería Ambiental
Expediente estudiante Ing. Ariel Aragón González
Arch. MSc. Lic. Rodolfo Manuel Jaen Serrano; Tutor

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de arsénico total utilizando las tecnologías de los filtros KANCHAN versión GEM 505 Y SONO filter MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935, 2002, para la remoción de arsénico total cuando la concentración de arsénico en agua está entre 80 µg/L - 100 µg/L. Se construyó un filtro KANCHAN y un SONO filter, utilizando materiales disponibles localmente. Los filtros se construyeron, instalaron y operaron en los laboratorios del CIEMA-UNI. El agua, fue recolectada semanalmente de un pozo ubicado en la comunidad de Mina la India, Municipio de Santa Rosa del Peñón, Departamento de León una vez por semana y era transportaba al CIEMA-UNI. El tiempo de retención del agua utilizado en ambos filtros fue de 20 minutos. El filtro KANCHAN obtuvo una eficiencia de remoción de arsénico en el primer ciclo de 87,50 % - 97,75 %, con media de 96,6 %, removiendo entre 70 µg/L y 87 µg/L con media de 80 µg/L de arsénico total, en el segundo y tercer ciclo fue de 97,53 % - 97,75 %, con media de 97,6 %, removiendo entre 79 µg/L y 87 µg/L con media de 82 µg/L de arsénico total y el SONO filter modificado obtuvo una eficiencia de remoción de arsénico de 34,1 % - 68,5 % con media del 51,5 %, removiendo entre 28 µg/L y 62 µg/L con media de 43 µg/L de arsénico total. El filtro KANCHAN demostró que puede ser construido con materiales locales y de operación sencilla, haciéndolo apto para el tratamiento de agua contaminada con arsénico en la concentración estudiada. La eficiencia de remoción de arsénico con el filtro KANCHAN fue mayor del 95 % y con el SONO filter modificado fue menor del 51,5 %.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2. HIPÓTESIS DEL ESTUDIO.	5
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. <i>Objetivo General.</i>	5
1.3.2. <i>Objetivos Específicos.</i>	5
II. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.....	6
2.1. ARSÉNICO EN EL AGUA.	6
2.1.1. <i>Especiación del arsénico.</i>	7
2.1.2. <i>Distribución del arsénico.</i>	8
2.2. TOXICIDAD DEL ARSÉNICO EN EL AGUA.	10
2.2.1. <i>Efectos en la salud pública.</i>	10
2.2.2. <i>Población expuesta y estudios epidemiológicos en Nicaragua.</i>	14
2.3. PROCESO DE TRATAMIENTO DE ARSÉNICO.	14
2.4. TÉCNICA DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO.....	15
2.5. REMOCIÓN DE ARSÉNICO A BASE DE HIERRO.....	16
2.5.1. <i>Influencia del hierro natural.</i>	18
2.5.2. <i>Influencia de los Fosfatos.</i>	18
2.5.3. <i>La corrosión del hierro.</i>	19
2.6. FILTRACIÓN LENTA DE ARENA.	20
2.6.1. <i>Mecanismo de transporte.</i>	20
2.6.2. <i>Mecanismo de adherencia.</i>	23
2.6.3. <i>Mecanismo biológico.</i>	24
2.6.4. <i>Pérdida de carga.</i>	25
2.7. TECNOLOGÍAS DOMICILIAR PARA REMOVER ARSÉNICO.....	25
2.7.1. <i>Debilidades y fortalezas de tecnologías existentes.</i>	26
2.7.1.1. <i>Calidad.</i>	26
2.7.1.2. <i>Cantidad.</i>	27
2.7.1.3. <i>Robustez.</i>	28
2.7.1.4. <i>Operación.</i>	28
2.7.1.5. <i>Impacto ambiental.</i>	29
2.7.1.6. <i>Aspectos socioeconómicos.</i>	30
2.7.2. <i>Características del filtro KANCHANTM.</i>	33
2.7.2.1. <i>Remoción de arsénico.</i>	34
2.7.2.2. <i>Remoción de Patógenos.</i>	34
2.7.2.3. <i>Remoción de hierro y turbiedad.</i>	35
2.7.2.4. <i>Tasa de Filtración.</i>	36
2.7.2.5. <i>Filtración Lenta en la remoción de arsénico.</i>	36
2.7.3. <i>SONO filter.</i>	38
2.7.3.1. <i>Materiales y funciones características del SONO filter.</i>	39
2.7.3.2. <i>Mecanismo de remoción del arsénico.</i>	42

2.7.3.3.	Remoción de otros elementos en el agua.....	44
2.8.	ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN CON ARSÉNICO EN NICARAGUA.	44
2.9.	TECNOLOGÍA UTILIZADA PARA LA DETECCIÓN DE ARSÉNICO.	47
III.	DISEÑO METODOLÓGICO DEL ESTUDIO.....	51
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO.	51
3.2.	PROGRAMA DE TRABAJO.	53
3.3.	MODELOS EXPERIMENTALES.	54
3.3.1.	<i>Filtro KANCHAN.</i>	54
3.3.2.	<i>SONO filter.</i>	55
3.4.	MÉTODO EXPERIMENTAL.	56
3.4.1.	<i>Configuración de los filtros.</i>	56
3.4.1.1.	Unidad Principal.	57
3.4.1.2.	Sección de adsorción de arsénico.	57
3.4.1.3.	Tiempo de Retención o Contacto.	59
3.4.1.4.	Sección de Filtración Lenta.	61
3.4.2.	<i>Construcción de los filtros.</i>	66
3.4.2.1.	Accesorios de PVC.	66
3.4.2.2.	Oxidación de los clavos.	67
3.4.2.3.	Procedimiento de construcción.	67
3.5.	OPERACIÓN DE LOS FILTROS.	72
3.5.1.	<i>Ciclo de filtración.</i>	73
3.5.2.	<i>Variables de estudio.</i>	74
3.5.3.	<i>Parámetros de control de calidad de agua.</i>	76
3.5.4.	<i>Método de Análisis de Laboratorio.</i>	78
3.6.	VALORACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS FILTROS.....	83
3.6.1.	<i>Eficiencia de remoción.</i>	84
3.6.2.	<i>Tasa de filtración.</i>	84
3.6.3.	<i>Operación de los filtros.</i>	84
3.6.4.	<i>Riesgo operacional.</i>	85
3.6.5.	<i>Impacto ambiental.</i>	85
3.6.6.	<i>Inversión inicial.</i>	85
3.6.7.	<i>Adaptabilidad.</i>	86
IV.	RESULTADOS.....	87
4.1.	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE POZO.	87
4.2.	EFICIENCIA DE LOS FILTROS.....	90
4.2.1.	<i>Remoción de arsénico.</i>	90
4.2.2.	<i>Tasa de filtración.</i>	93
4.2.3.	<i>Turbiedad.</i>	95
4.2.4.	<i>Hierro.</i>	97
4.2.5.	<i>Características del agua filtrada.</i>	98
4.2.6.	<i>Evaluación cuantitativa de los filtros.</i>	100
4.3.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	101
4.4.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO.	103

V. CONCLUSIONES.	104
5.1. RECOMENDACIONES.	107
VI. BIBLIOGRAFIA.	111
VII. ANEXOS.	115
ANEXO 1. TABLAS COMPLEMENTARIAS.	115
ANEXO 2. CERTIFICADOS DE ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA.	127
ANEXO 3. RESULTADO DE LABORATORIO DE MUESTRA DE ARENA.	130
ANEXO 4. GALERÍA DE FOTOS.	133

TABLAS

Tabla 1: Estabilidad y predominio de las especies de arsénico según los rangos de pH en el medio acuático.....	7
Tabla 2. Eficiencia de remoción de contaminantes, según tecnología. (Fuente: Torres, 2006).....	27
Tabla 3. Cantidades de agua obtenida según tecnología. (Fuente: Torres, 2006).	28
Tabla 4. Resumen de la robustez de las tecnología. (Fuente: Torres, 2006).	28
Tabla 5. Riesgos operacionales de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).	29
Tabla 6. Impacto ambiental de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).....	29
Tabla 7. Costos anuales y de inversión de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).	30
Tabla 8. Tiempo de espera y metodología de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).	31
Tabla 9. Resumen de uso de materiales autóctonos y adaptabilidad de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).	32
Tabla 10. Especificaciones generales de los materiales usados en SONO filter, función y construcción.....	40
Tabla 11. Posibles reacciones fisicoquímicas en diferentes partes del proceso de filtración en el SONO filter, (Tomado de Hussam y Munir, 2007).	43
Tabla 12. Coeficiente de correlación parámetros fisicoquímicos en Mina la India. (Tomado de Barragne-Bigot, 2004).	47
Tabla 13. Dimensiones del balde del filtro KANCHAN.....	57
Tabla 14. Dimensiones de los baldes del SONO filter modificado.....	57
Tabla 15. Dimensiones de la Pana del filtro KANCHAN.....	58
Tabla 16. Dimensiones de la Pana del SONO filter modificado.	60
Tabla 17. Ensayo granulométrico de la arena de Cauce Momotombo.....	63
Tabla 18. Arreglo del filtro KANCHAN.....	69
Tabla 19. Arreglo del SONO filter (Modificado).....	72
Tabla 20. Criterio de valoración general de la evaluación del comportamiento de los filtros.	86
Tabla 21. pH y potencial redox ajustado de muestra de agua de pozo.....	87

Tabla 22. Valores de arsénico total en agua de pozo.....	88
Tabla 23. Parámetros de agua de pozo.	89
Tabla 24. Concentración de hierro y fósforo en agua de pozo.	89
Tabla 25. Remoción de arsénico de SONO filter modificado y filtro KANCHAN.....	90
Tabla 26. Tasa de filtración de SONO filter modificado y filtro KANCHAN.	93
Tabla 27. Remoción de turbiedad con filtro KANCHAN y SONO filter modificado.	95
Tabla 28. Concentración de hierro en agua de pozo y filtrada del filtro KANCHAN.	97
Tabla 29. Parámetros de calidad de agua filtrada con SONO filter modificado.	98
Tabla 30. Parámetros de calidad de agua filtrada con filtro KANCHAN.	99
Tabla 31. Evaluación del comportamiento de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado.....	100
Tabla 32. Costos de construcción de filtro KANCHAN y SONO filter modificado.	115
Tabla 33. Correlación de datos.	116
Tabla 34. Remoción de arsénico y filtración de agua por SONO filter modificado.	118
Tabla 35. Parámetros de calidad de agua filtrada con SONO filter modificado.	119
Tabla 36. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Primer Ciclo).	120
Tabla 37. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).	122
Tabla 38. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).	123
Tabla 39. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Primer ciclo).	123
Tabla 40. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Segundo ciclo).	125
Tabla 41. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Tercer ciclo).	126

FIGURAS

Figura 1. Distribución en el agua de las especies de arsénico en función de pH-Eh. (Tomado de Lillo, año 2005).....	9
Figura 2. Diagrama de pH para arsénico (V). (Tomado de Vu y colaboradores, 2003).	10
Figura 3. Distribución de las especies de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Simeonova y colaboradores, 2006).	17
Figura 4. Movilidad de arsénico en presencia de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Simeonova y colaboradores, 2006).....	17
Figura 6. Profundidad de la capa de arena vs. Concentración de hierro (%) y concentración de arsénico (ppm). (Tomado de Ghimire, 2005).	37
Figura 7. Correlación arsénico vs. t°. (Tomado de UNICEF, 2004).	45
Figura 8. Correlación Profundidad vs. T°. (Tomado de UNICEF, 2004).	46
Figura 9. Especies de arsénico presente en la zona de Mina la India. (Tomado de UNICEF, 2004).	46
Figura 10. El Wagtech Arsenator. Tomado de http://www.wagtech.co.uk/products/water-and-environmental/water-test-kits/arsenator , 2008.	50
Figura 11. Fuente de agua seleccionada contaminada con arsénico. Comunidad Mina La India. (Foto: Ariel Aragón, 2008).....	52
Figura 12. Ubicación de fuente de agua seleccionada. (Fuente: Elaboración propia, 2008).	52
Figura 13. Componentes del KAF TM . (Tomado de Ngai y colaboradores, 2006).	55
Figura 14. Diagrama de SONO-FILTER, Modelo SF-TWIN, Patent 1003935, 2002. (Tomado de Hussam y Munir, 2007).....	56
Figura 15. Curva granulométrica de la arena menor de 1 mm.	64
Figura 16. Distribución en el agua de la especie de arsénico en función de pH-Eh y a una concentración total de 10 ⁻⁶ mol/L de arsénico.....	88
Figura 17. Comportamiento semanal de la concentración de arsénico en agua de pozo.	89
Figura 18. Remoción de arsénico con SONO filter modificado.....	91
Figura 19. Concentración de arsénico en el agua filtrada con SONO filter modificado.....	92

Figura 20. Remoción de arsénico con filtro KANCHAN.	92
Figura 21. Remoción de arsénico vs. norma CAPRE, 1994 con filtro KANCHAN.....	93
Figura 22. Tasa de filtración con SONO filter modificado.	94
Figura 23. Tasa de filtración con filtro KANCHAN.....	95
Figura 24. Turbiedad en agua filtrada con SONO filter modificado.....	96
Figura 25. Turbiedad en agua filtrada con filtro KANCHAN.....	97
Figura 26. Concentración de hierro en agua filtrada con filtro KANCHAN.	98

I. INTRODUCCIÓN.

El arsénico es un elemento metaloide que se comporta como un metal pesado en muchas características físico-químicas. Está presente en forma natural en rocas sedimentarias, rocas volcánicas y aguas geotermales, formando un 0,00005 % de la corteza terrestre en sus formas orgánica o inorgánica y se ubica en el lugar 20 en cuanto a abundancia en el medio natural, (Mohan y Pittman, 2007).

En Nicaragua las principales concentraciones de arsénico en la roca, suelo y agua se encuentran asociadas a procesos hidrotermales singenéticos (primarios) y epigenéticos (secundarios), evidenciados a lo largo de fallas y fracturas Noreste y Noroeste principalmente, propios de la geodinámica de Nicaragua Occidental. Situación propiciado por el proceso de subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe, motor principal de la formación de la Depresión de Nicaragua, (Altamirano, 2005).

Concentraciones peligrosas de arsénico en el agua natural alrededor del mundo es ahora un problema referido como una calamidad del siglo XX y el presente siglo XXI, (Mohan y Pittman, 2007). Aproximadamente una de cada 100 personas que beben durante largo tiempo agua con una concentración de arsénico superior a 0,05 mg/L (50 µg/L) posiblemente muera de cáncer asociado al arsénico. La proporción asciende a un 10 % si las concentraciones rebasan 0,5 mg/L (500 µg/L), (OMS, 2001). La mayor amenaza que conlleva el arsénico para la salud pública proviene del agua de bebida, generalmente como resultado de la ingestión prolongada de agua con bajas concentraciones de arsénico inorgánico, (OMS 2006). El problema de la contaminación por arsénico en zonas rurales se agudiza cuando no existen fuentes seguras de agua. Una de las estrategias más comunes de mitigación en esas zonas comprende la remoción del arsénico de las aguas contaminadas antes de consumirlas, (OMS, 2006).

Ante esta situación los investigadores han venido desarrollado algunas tecnologías para ser usadas a nivel de hogar en el sector rural que resulte menos costosa, prácticas y eficientes para la remoción de arsénico total en aguas de consumo humano. En Nepal se ha usado el filtro de arsénico KANCHAN (AKF) construido con materiales locales, como ladrillos,

clavos, arena y grava, logrando remover satisfactoriamente el arsénico. En Bangladesh el SONO filter que evolucionó a partir del sistema llamado filtro Kolshi; consiste en poner dos recipientes verticalmente, uno encima del otro, los materiales que lo conforman son arena, carbón orgánico y una matriz compuesta de hierro patentada.-no existe experiencia de aplicación de estas técnicas de remoción de arsénico en Nicaragua.

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de los sistemas de remoción de arsénico conocidos como KANCHAN y SONO filter en agua subterránea con concentración entre 80 µg/L – 100 µg/L de arsénico total. La selección de estas tecnologías se basó en su uso domiciliario, sencillez y bajo costo en construcción y operación, uso de materiales comunes y por el éxito obtenido en las áreas rurales de otros países con problemas de contaminación de arsénico en fuentes de agua para consumo humano. El diseño y la configuración de los filtros estuvo determinada finalmente, por los materiales que están disponibles localmente y que pueden ser encontrados en cualquier parte del país, respetando el principio físico y químico de cada tecnología. Otros criterios considerados para el diseño fue la tasa de filtración, valor límite permisible de arsénico, turbiedad y hierro que cumplieran con la norma de calidad de agua potable (normas CAPRE, 1994).

La evaluación de los filtros se realizó en el CIEMA-UNI con agua con una concentración de arsénico total promedio de 83 µg/L, proveniente de un pozo ubicado en la comunidad de Mina La India, Municipio de Santa Rosa del Peñón, Departamento de León. Esta comunidad Mina La India, de acuerdo al índice de peligrosidad por contaminación de arsénico, presenta un $I = 8,1$, lo cual equivale a un rango de peligrosidad “alta”, (Barragne-Bigot, 2004). Cuenta con un sistema de abastecimiento con fuente de agua segura, es decir con concentraciones de arsénico permisibles, en el período de investigación este sistema no estaba operando. Cuando ocurre esta situación la comunidad se abastece de fuentes privadas (pozo excavado a mano, pozos comunales), sin ninguna seguridad de que el agua no está contaminada con arsénico.

1.1. Justificación.

La OPS reconoce que en diferentes estudios epidemiológicos se ha encontrado evidencias sobre el efecto en la salud por el consumo de agua con arsénico. Las enfermedades causadas por el arsénico son: hiperqueratosis palmar y plantar; hiper e hipopigmentación de cara, cuello y tórax, lesiones vasculares periféricas; cáncer a la piel, pulmón, hígado, riñón y vejiga.

El valor guía de la OMS vigente respecto de la presencia de arsénico en el agua de bebida es de (0,01 mg/L). Este valor límite es provisional porque hay incertidumbres no resueltas científicamente. Si se obtuviera de estudios epidemiológicos rigurosos mayor información sobre los efectos sanitarios en niños, observados en diferentes condiciones, se aportaría una contribución al desarrollo ulterior de los valores guías. Se desconocen todavía el mecanismo de la carcinogenicidad y la respuesta a niveles bajos de ingesta. Además, se señalan diferencias considerables entre los efectos según los países y regiones, diferencias cuyas razones todavía no se entienden lo suficiente. La susceptibilidad de cada uno a la intoxicación por arsénico, también difiere considerablemente, según la edad, el estado nutricional, las condiciones sociales y otros factores insuficientemente conocidos, (OMS, 2006).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, USEPA, clasifica al arsénico como carcinógeno en el grupo A, debido a que existe evidencia suficiente de carcinogenicidad tanto en animales como en poblaciones humanas. La exposición a 0,05 mg/L puede causar 31,33 casos de cáncer de la piel por cada 1000 habitantes y ha considerado bajar el límite máximo de aceptación de 0,050 mg/L, al de 0,010 mg/L – 0,020 mg/L. El Centro Internacional para la Investigación del Cáncer, IARC por sus siglas en ingles, lo ha clasificado en el grupo I, porque tienen pruebas suficientes de la carcinogenicidad para seres humanos. La eliminación natural del organismo humano es por vía urinaria, heces, sudor y epitelio de la piel (descamación), (Esparza y Medina, 1998).

A nivel nacional, un 5,7 % de los puntos de abastecimiento de agua subterránea tienen valores de arsénico total por encima del valor máximo admisible de 10 µg/L, (PIDMA –

UNI, 2002). Si la prevalencia nacional de los puntos de abastecimiento de agua que son contaminados naturalmente por arsénico es de 5,7 % y existen alrededor de 4886 sistemas de agua rurales registrados en Nicaragua, (Valle, 2003), se puede estimar que 278 sistemas de agua administrados por los Comité de Agua Potable y Saneamiento (CAPs) están contaminados. La mayoría de estos sistemas abastecen pequeñas comunidades rurales dispersas o semi-concentradas en cabeceras municipales y pequeños poblados. Tomando un promedio conservador de 200 personas por sistemas de agua, se puede estimar que aproximadamente 55700 personas están ingiriendo agua contaminada con arsénico, (UNICEF, 2003).

Se decidió realizar la presente investigación sobre la eficiencia de remoción de arsénico total utilizando las tecnologías KANCHAN y SONO filter porque estos filtros son de uso domiciliario, cuentan con buena aceptación por su efectividad, sencillez de uso y bajo costos, lo cual es ideal para la población de las comunidades rurales. Han sido implementados con éxitos en aguas subterráneas de países como Bangladesh y Nepal, donde los niveles de concentración de arsénico son altos en las fuentes de agua que es consumida por la población.

Uno de los principales beneficios de la investigación es que determina cual de las dos tecnologías es más aplicable a nuestro país, en cuanto a; eficiencia de remoción de arsénico total, cumplimiento de la norma CAPRE, 1994, costos, operación y adaptabilidad y uso de materiales locales lo cual permitirá su implementación en cualquier comunidad del país donde se presente contaminación del agua con arsénico.

Al ser de uso domiciliario pueden desarrollarse programas de mitigación de arsénico en comunidades rurales donde la población es dispersa y difícil de instalar un acueducto que abastezca de agua potable. Puede haber una buena aceptación por parte de las familias campesinas nicaragüenses ya que la construcción puede ser realizada por personas con ningún conocimiento de los filtros, bastando con la demostración y guía de un técnico capacitado, además, no se utiliza ningún químico y la operación es sencilla.

Los resultados de esta investigación proveen valiosa información para la selección e implementación de un sistema de remoción de arsénico a nivel domiciliario en el área rural del país.

1.2. Hipótesis del estudio.

La hipótesis del estudio fue: “Los sistemas filtro de arsénico KANCHAN y SONO filter modificado remueven de forma eficiente la concentración de arsénico en el rango de 80 µg/L – 100 µg/L, logrando alcanzar el valor máximo de concentración de arsénico permitido por las normas aceptadas a nivel nacional”.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar la eficiencia de remoción de arsénico total utilizando las tecnologías de los filtros KANCHAN Y SONO filter modificado con agua de pozo con concentración de arsénico total que oscila entre 80 µg/L – 100 µg/L, ubicado en la comunidad de Mina la India, durante el período comprendido de octubre de 2008 a enero de 2009.

1.3.2. Objetivos Específicos.

1. Diseñar y construir el filtro KANCHAN y SONO filter modificado con base al diseño original y utilizando materiales locales.
2. Evaluar el comportamiento de remoción de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado considerando como variables en el agua el arsénico, hierro, fosfato, pH, conductividad eléctrica, potencial redox, turbiedad y temperatura.
3. Determinar la tasa de filtración de agua tratada de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado.
4. Identificar ventajas y desventajas de la aplicación de las tecnologías KANCHAN y SONO filter modificado para la remoción de arsénico a nivel domiciliario en las áreas rurales del país.

II. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.

2.1. Arsénico en el agua.

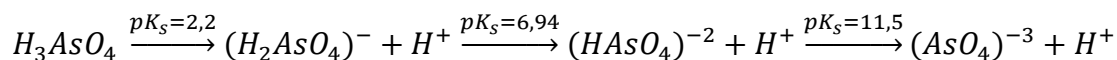
El arsénico es un elemento que se encuentra en el grupo 15 (VA) de la tabla periódica, tiene un número atómico de 33 y masa atómica de 74,92, con cinco electrones en su órbita exterior. Rara vez se encuentra libre en el ambiente natural, su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua. El arsénico está presente en forma natural en rocas sedimentarias y rocas volcánicas y en aguas geotermales con mayor frecuencia como sulfuro de arsénico y arsenopirita, los que se encuentran como impurezas en los depósitos mineros, o como arsenato y arsenito en las aguas superficiales y subterráneas, (EPA, 2000).

En el agua la combinación con el oxígeno le permite formar el arsénico inorgánico pentavalente (As^{+5}) y el arsénico inorgánico trivalente (As^{+3}). En medios alcalinos con alta concentración de oxígeno se encuentra el As^{+5} (arseniato) y en medios ácidos con poca concentración de oxígeno se encuentra el As^{+3} (arsenito). Por lo que se deduce que el arsenato es encontrado frecuentemente en agua superficiales, en condiciones aeróbicas, mientras que el arsenito ocurre con más frecuencia en aguas subterráneas o de pozo, en condiciones anaeróbicas, (EPA, 2000).

Las especies hidrolizadas con valencia 3 son ácido arsenioso H_3AsO_3 , arsenito diácido (H_2AsO_3)⁻, arsenito monoácido (HAsO_3)⁻² y arsenito (AsO_3)⁻³ y con valencia 5 son ácido ortoarsénico H_3AsO_4 , arseniato diácido (H_2AsO_4)⁻, arseniato monoácido (HAsO_4)⁻² y arseniato (AsO_4)⁻³. Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y aquellas que favorecen la reducción cambiarán el equilibrio al estado trivalente, (Esparza y Medina, 1998).

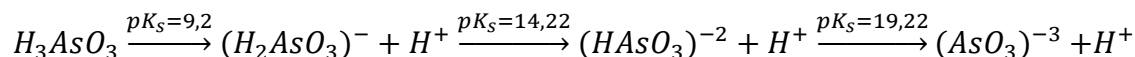
La eficiencia de los procesos de tratamiento del arsénico, depende del grado de disociación del arsénico. La capacidad de ionización del arsénico (V) le permite combinarse fácilmente con otros compuestos, lo cual hace que su remoción por diversos métodos sea más eficiente en comparación con la del arsénico (III). Los arsenatos tienen mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace, la molécula que al perder el ion

hidrógeno por la disociación, queda con carga negativa, formando varios aniones según las ecuaciones, (Esparza y Medina, 1998).



En aguas con altos niveles de oxígeno, el As^{+5} como H_3AsO_4 es estable, existiendo las especies en un rango de pH de entre 2 a 13, la distribución de estas se muestra en la tabla 1, (Esparza y Medina, 1998).

Como resultado de la disociación del ácido arsenioso característico en aguas subterráneas con pH mayor de 7, se presentan las siguientes formas, (Esparza y Medina, 1998).



En condiciones anóxicas, aún a pH mayor que 7 el arsénico es estable en especies dominantes no iónicas, (Esparza y Medina, 1998).

Lo anterior determina que los arsenatos y arsenitos se disocian a un pH muy diferente. En un rango de pH entre 6,5 y 8,5 característico del agua natural, las formas predominantes de arsenato son las especies H_3AsO_4 , $(H_2AsO_4)^-$ y las formas predominantes de arsenitos es la especie H_3AsO_3 , (Esparza y Medina, 1998).

Tabla 1: Estabilidad y predominio de las especies de arsénico según los rangos de pH en el medio acuático.

pH	0-9	10-12	13	14
As^{+3}	H_3AsO_3	$(H_2AsO_3)^-$	$(HAsO_3)^{-2}$	$(AsO_3)^{-3}$
pH	0-2	3-6	7-11	12-14
As^{+5}	H_3AsO_4	$(H_2AsO_4)^-$	$(HAsO_4)^{-2}$	$(AsO_4)^{-3}$

Tomado de (Esparza y Medina, 1998)

2.1.1. Especiación del arsénico.

El potencial redox (Eh) y el pH son los parámetros más importantes que controlan la especiación del arsénico, o sea su estado de oxidación. Bajo condiciones oxidantes, las

especiaciones pentavalentes arsénico (V) son estables con un pH creciente: $(\text{H}_2\text{AsO}_4)^-$ es dominante cuando el pH es menos de 6,9 aproximadamente. Con un pH superior a 6,9, $(\text{HAsO}_4)^{2-}$ predomina, ver tabla 1. En condiciones reductantes, el arsénico (V) es reducido en arsénico (III) y las especiaciones trivalentes arsénico (III) predominan, (Esparza y Medina, 1998).

En contraste, el arsénico (V) depende del pH. El arsénico (III) es encontrado virtualmente independiente del pH en ausencia de aniones adsorbentes (Smedley y Kinniburg, 2002). Más a menudo el arsénico (III) es encontrado en condiciones de reducción en el agua subterránea, mientras lo contrario ocurre con arsénico (V) que es encontrado en condiciones oxidantes del agua subterránea, (Vu y colaboradores, 2002).

Las concentraciones de arsénico (III) y arsénico (V) varían ampliamente dependiendo de las condiciones reducción-oxidación presentes en el medioambiente geológico, (Jain y Ali, 2000).

2.1.2. Distribución del arsénico.

El fenómeno de la existencia de contenidos altos de arsénico de origen natural en las aguas está controlado por tres factores: la fuente primaria de arsénico (geósfera y atmósfera), los procesos de movilización/retención de arsénico en la interacción entre la fase sólida y la fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua, (Lillo, 2005). Respecto al primer factor, una de las características comunes en la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico no asociados a procesos geotermales, ni a depósitos minerales, ni a un origen antropogénico, es que los materiales que forman el acuífero tienen contenidos en arsénico próximos a los valores considerados como contenido medio de fondo (0,5 ppm - 1,0 ppm en areniscas, 13 ppm en arcillas y pizarras, 1 ppm - 1,5 ppm en carbonatos), (Lillo, 2005). En otras palabras, contenidos elevados de arsénico en las aguas subterráneas no se asocia, por lo general, a materiales con contenidos altos de arsénico (Smedley y Kinniburgh, 2002).

La distribución en el agua de los estados de oxidación del arsénico está en función del pH y del Eh a una temperatura de 25° C y bajo una presión de 1 atmósfera.

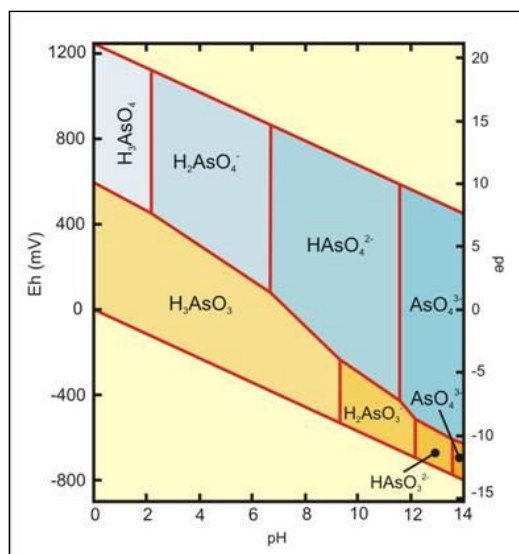


Figura 1. Distribución en el agua de las especies de arsénico en función de pH-Eh. (Tomado de Lillo, año 2005).

El diagrama pH vs Eh es una herramienta clave para entender la movilidad del arsénico en el agua subterránea y marcar guías para su eficiente tratamiento, (Simeonova y colaboradores, 2006).

A diferencia de otras trazas de metales tóxicos cuya solubilidad tiende a bajar cuando el pH incrementa, más oxianiones, incluyendo el As^{+5} , tienden a convertirse en mas soluble cuando el pH incrementa, (figura 2). Cuantos más otros metales se convierten en insoluble con pH neutro. El arsénico es soluble cada vez que está cerca del pH neutro en concentraciones relativamente altas. Esta es la razón porque el agua subterránea es contaminada fácilmente con arsénico y otros oxianiones.

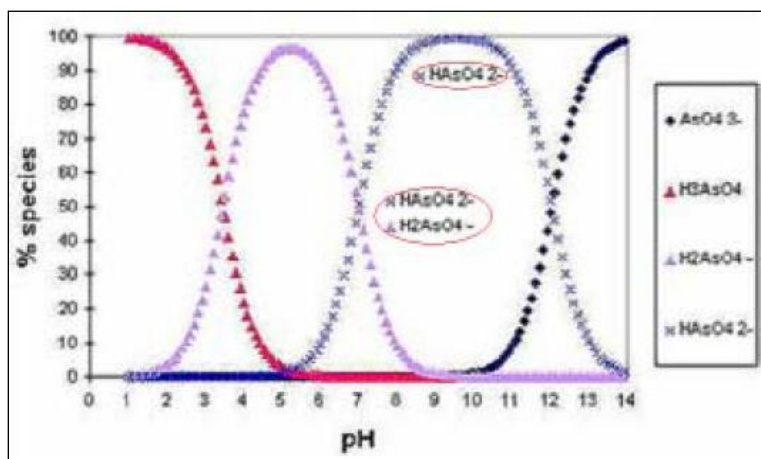


Figura 2. Diagrama de pH para arsénico (V). (Tomado de Vu y colaboradores, 2003).

2.2. Toxicidad del arsénico en el agua.

El arsénico es uno de los tóxicos más viejos conocidos por la humanidad. Tiene seis características específicas, según Azcui y Nriagu, 1994:

1. Es un tóxico violento en la ingestión aguda.
2. Es sumamente tóxico a la exposición a largo plazo en concentraciones muy bajas.
3. No es visible en el agua y comida.
4. No tiene gusto.
5. No tiene olor.

Las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación, que es acumulable en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones. La toxicidad del arsénico aumenta considerablemente con su estado de oxidación de arsénico (V) a arsénico (III). El As^{3+} es alrededor de 60 veces más tóxico que el estado oxidado As^{5+} y los componentes inorgánicos son alrededor de 100 veces más tóxicos que los componentes orgánicos del arsénico, (Jain y Ali, 2000).

2.2.1. Efectos en la salud pública.

Las principales rutas de exposición al arsénico son la ingesta e inhalación. El arsénico se acumula en el organismo por exposición crónica y, en ciertas concentraciones, ocasiona afecciones como alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y dilatación

de los mismos) con efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los sistemas respiratorio, gastrointestinal y hematopoyético, y acumulación en los huesos, músculos y piel, y en menor grado en el hígado y los riñones. La evidencia epidemiológica señala que las personas que han ingerido arsénico inorgánico de manera prolongada, a través de agua de bebida, sufren de hiperqueratosis palmoplantar, cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades en las palmas de las manos y pies, (Esparza, 2006).

En el agua de bebida, por lo general el arsénico se encuentra en la forma de arsenato y puede ser absorbido con facilidad en el tracto gastrointestinal en una proporción entre 40 y 100 %, (Frederick y colaboradores, 1994). El arsénico inorgánico ingerido pasa al torrente sanguíneo, donde se enlaza a la hemoglobina y en 24 horas puede encontrarse en el hígado, riñones, pulmones, bazo y piel. Los órganos de mayor almacenamiento son la piel, el hueso y el músculo, (Health Canada, Ottawa, 1992).

Su acumulación en la piel se debe a la fácil reacción con las proteínas (con grupos de sulfihidrilo), (Health Canada, Ottawa, 1992). Los cambios metabólicos del arsénico ocurren esencialmente en el hígado, donde los tioles endógenos tienen un papel crítico en la conversión del As^{+3} y As^{+5} . Al parecer, el glutatión (GSH) actúa como agente reductor. Las formas de As^{+3} resultantes pueden metilarse (oxidación y formación de metilarsénico (As^{+5}) al aceptar este grupo funcional de la S-adenosilmetionina (ASM). El probable producto final de la metilación continua es el dimetilarsenato (DMA). Las especies de metilarsénico (As^{+3}) y As^{+5} intermedias en el proceso pueden ser tóxicas e inhibir por ejemplo a la glutatión reductasa (GR), enzima clave en el metabolismo del GSH y cuya acción (GR) es crítica para mantener las reacciones redox propias de las células, (The National Academy of Sciences, 1999).

En el organismo humano el As^{+3} y As^{+5} tienen diferentes mecanismos de acción. El As^{+5} muestra un comportamiento parecido al del fosfato, pero difiere con este en la estabilidad de sus ésteres. Los ésteres del ácido fosfórico son estables, lo que permite la existencia del ácido desoxirribonucleico (ADN) y la adenosina 5-trifosfato (ATP). En cambio, los ésteres ácidos de As^{+5} son hidrolizables. Las enzimas pueden aceptar al arsenato e incorporarlo en

compuestos como el ATP, pero los compuestos análogos formados se hidrolizan inmediatamente, por ello, el arsenato puede inactivar el metabolismo oxidativo de la síntesis del ATP. En contraste, el As^{+3} tiene alta afinidad con los grupos tioles de las proteínas y puede inactivar una variedad de enzimas, como la piruvato deshidrogenasa y 2-oxoglutarato deshidrogenasa (Frederick y colaboradores, 1994; The National Academy of Sciences, 1999). En cambio, el monometilarsenato (MMA) y el dimetilarsenato (DMA) no forman enlaces fuertes con las moléculas biológicas humanas. Esto explica por qué su toxicidad aguda es menor que la del arsénico inorgánico.

La cinética relacionada con la toxicidad del arsénico inorgánico, incluido el cáncer, aún no se ha establecido. La explicación más aceptable es la inducción a una anormalidad cromosomática sin actuar directamente con el ADN. El arsénico inorgánico ingerido es absorbido por los tejidos y luego se elimina progresivamente por metilación; su excreción ocurre en la orina a través de los riñones. Cuando la ingestión es mayor que la excreción, tiende a acumularse en el cabello y en las uñas. Los niveles normales de arsénico en la orina, el cabello y las uñas son 5 - 40 g/día, 80 - 250 g/kg y 430 - 1080 g/kg, respectivamente (The National Academy of Sciences, 1999). La sensibilidad de las personas a los efectos tóxicos del arsénico inorgánico varía, dependiendo de la genética, metabolismo, dieta, estado de salud y sexo. Estos factores deben considerarse en la evaluación de riesgos a la exposición de arsénico. Las personas con mayor riesgo son las que tienen poca capacidad para metilar arsénico y por lo tanto lo retienen más; los más vulnerables son los niños y las personas con nutrición deficiente. En algunas especies de mamíferos se ha demostrado que el arsénico inorgánico y orgánico son teratógenos y su administración oral afecta el crecimiento fetal y la viabilidad prenatal. Un suplemento con alto contenido de arsénico (por ejemplo, 350 - 4500 ng por gramo en la dieta afecta el crecimiento y la reproducción en los animales (The National Academy of Sciences, 1999). Los estudios han determinado que la orina es el mejor biomarcador para medir la dosis absorbida de arsénico inorgánico, ya que la sangre, cabello y uñas son menos sensibles a la exposición (The National Academy of Sciences, 1999).

El consumo de agua con arsénico no conlleva a casos con efectos agudos; los efectos de esta exposición son crónicos al ingerir pequeñas cantidades en el largo plazo, (Esparza, 2006). En Bangladesh se reconocieron cuatro etapas en los cuadros de arsenicismo:

Preclínico: el paciente no presenta síntomas, pero el arsénico se puede detectar en muestras de tejido y orina.

Clínico: etapa con efectos en la piel. Se oscurece la piel (melanosis) de la palma de la mano y también se pueden presentar manchas oscuras en el pecho, espalda, miembros y encías. Un síntoma más serio es la queratosis o endurecimiento de la piel en forma de nódulos en las palmas y las plantas de las manos y los pies. La OMS estima que esta etapa requiere una exposición al arsénico de 5 a 10 años.

Complicaciones: se presentan síntomas clínicos más pronunciados y afectación de los órganos internos. Se ha reportado dilatación del hígado, los riñones y el bazo. Esta etapa también se ha vinculado con conjuntivitis, bronquitis y diabetes.

Malignidad: hay desarrollo de tumores o cánceres que afectan la piel pulmón o vejiga. En esta etapa, la persona afectada puede desarrollar gangrena.

En las dos primeras etapas si el paciente reemplaza la fuente de agua de bebida contaminada por una libre de arsénico, su recuperación es casi completa. En la tercera etapa puede ser reversible, pero en la cuarta ya no lo es, (BCAS, 1997). El tratamiento general es proporcionar al paciente agua de bebida libre de arsénico. El siguiente paso es monitorearlo y asegurarse de que no esté expuesto a este elemento. Otros tratamientos son la quelación y la mejora de la nutrición. En Bengala y Bangladesh se ha empleado la quelación, pero se desconoce si puede llegar a remover el arsénico unido a la piel y no asegura su efectividad si el paciente continúa con el consumo de agua contaminada. De acuerdo con las evidencias encontradas en Taiwán, los factores nutricionales pueden modificar el riesgo de cáncer asociado al arsénico. La administración de vitaminas (A y suplementos multivitamínicos) y el mejoramiento de la nutrición pueden mejorar a los pacientes, sobre todo cuando hay afecciones de la piel, (Esparza, 2006).

2.2.2. Población expuesta y estudios epidemiológicos en Nicaragua.

En el año 2001, el UNICEF convocó a las instituciones nacionales e internacionales para un taller de trabajo que abordó la contaminación por arsénico a través del agua de consumo humano que enfrentan los pobladores de la comunidad de El Zapote y sus alrededores, en el Valle de Sébaco. En el encuentro se entregó un formulario para el registro de “atención de pacientes con arsenicismo”, que debe ser llenado por el personal sanitario local. Se atendieron 111 personas con antecedentes de ingesta de agua contaminada con arsénico y se encontró que los pobladores que ingirieron mayores niveles de arsénico tenían parestesia, edema en miembros inferiores, ardor ocular, lesiones cutáneas y problemas respiratorios, (PIDMA/UNICEF, 2002).

También hubo queratosis e hiperpigmentación propias del arsenicismo crónico; dos pacientes tenían esplenomegalia e hipertensión y se vieron pocos casos de hepatomegalia y anemia. Se recomendó establecer un programa de prevención, tratamiento y control del arsenicismo, que garantice la continuidad de la atención de esos pacientes y realizar una campaña de educación popular en las comunidades afectadas y sus alrededores, (Gómez, 2002; Gómez y Alina, 2002). En otro estudio realizado por el UNICEF se identificaron ocho áreas con niveles de arsénico superiores a los normales (Santa Rosa del Peñón, La Cruz de la India, Cerro Mina de Agua, Kinuma, El Mojón y Las Pilas) y se recomendaron estudios más detallados y sistemáticos y el uso de metodologías analíticas de más bajo costo, (PIDMA/UNICEF, 2002).

2.3. Proceso de tratamiento de arsénico.

Los procesos químicos y fisicoquímicos en la remoción de arsénico se pueden resumir como, (Esparza, 2006):

Oxidación/ Reducción: Estas reacciones no remueven el arsénico de la solución, pero usualmente son utilizadas para optimizar otros procesos, especialmente para oxidar el arsenito (As^{+3}) a arseniato (As^{+5}). La reacción puede ser muy lenta si tiene que darse a

partir del oxígeno presente en el aire. Para acelerar la oxidación química es aconsejable usar cloro, dióxido de cloro, permanganato de potasio u ozono.

Precipitación: El arsénico disuelto en el agua es transformado a sólido mineral de baja solubilidad y formar sólidos con otros compuestos cuando se adiciona un coagulante. Este fenómeno es conocido con el nombre de co-precipitación. Los sólidos formados, llamados flóculos, pueden quedar suspendidos y requieren la remoción, a través de los procesos de separación sólido/líquido, típicamente la coagulación y la filtración.

Adsorción e intercambio iónico: Varios materiales sólidos, incluidos floculos de hidróxido de hierro y aluminio, tienen una fuerte afinidad para adsorber arsénico. El arsénico es fuertemente atraído por las superficies de sorción de estos sólidos y es eliminado de la solución. El intercambio iónico involucra el desplazamiento reversible de un ión adsorbido dentro de una superficie sólida por un ión disuelto.

Separación sólido/líquido: La precipitación, co-precipitación, adsorción e intercambio iónico transfieren el contaminante desde la fase disuelta a la fase sólida. En algunos casos el sólido es grande y fijo (ej.: resinas de intercambio iónico), y la separación sólido-líquido no es requerida. Si los sólidos son formados *in situ*, a través de la precipitación o coagulación, tienen que ser separados del agua. La forma más efectiva de hacerlo es mediante una filtración.

Exclusión física: Algunas membranas sintéticas son permeables a ciertos compuestos disueltos, pero excluyen otros. Estas membranas pueden actuar como filtro molecular para remover el arsénico disuelto, juntamente con otros compuestos particulados disueltos.

2.4. Técnica de remoción de arsénico.

Actualmente existen alrededor de 14 técnicas para remover el arsénico del agua. Las tecnologías para la remoción de arsénico (KANCHAN y SONO filter), objeto de evaluación en el presente estudio, se ubican en la técnica de remoción por adsorción del arsénico a base de hierro.

2.5. Remoción de arsénico a base de hierro.

Los sistemas basados en hierro para tratar el agua contaminada con arsénico son simples y de bajo costo, (Mahin y colaboradores, 2008). Cuando la concentración natural de Fe no es suficiente para alcanzar el nivel necesario para la remoción de arsénico, este puede ser adicionado, (EPA, 1997).

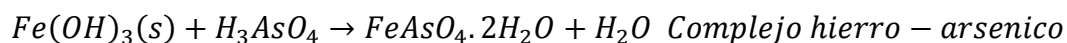
Debido a la dificultad de remover As^{+3} , por coagulación, se requiere de su oxidación a As^{+5} . Durante la remoción del arsénico son importantes los procesos de oxidación de las formas de As^{+3} a As^{+5} y de su adsorción por el hidróxido férrico amorfo, formado durante la coagulación, (Hering y colaboradores, 1996).

La oxidación del As^{+3} a As^{+5} se produce según las siguientes reacciones:



El arsénico se adsorbe mejor a los hidróxidos de hierro que otros oxidantes como el caso de los de aluminio (alúmina). El hidróxido férrico asegura la completa oxidación del arsénico (III) a arsénico (V) y es responsable de la adsorción del arsénico (V). La oxidación previa Fe^{+2} a Fe^{+3} conduce a la formación de hidróxidos que remueven el arsénico soluble por reacciones de adsorción y co-precipitación. Con Fe^{+2} sin oxidar no se produce la remoción de arsénico, (Hering y colaboradores, 1996).

De acuerdo a la bibliografía consultada, en general el mecanismo de adsorción del arsénico es el siguiente:



Superponiendo el diagrama pH-Eh de las especies de hierro con la del arsénico se puede obtener la zona de afinidad del arsénico (V) con las sales de hierro. La figura 3 muestra la zona de remoción efectiva de arsénico en función de las condiciones del potencial de oxidación- reducción pH-Eh. En esta zona, el anión de arsénico queda adsorbido sobre los

hidróxidos de hierro. En la figura 4 se observa además el arsénico adsorbido que se puede liberar en el agua subterránea que presenta poder de reducción, (Simeonova y colaboradores, 2006).

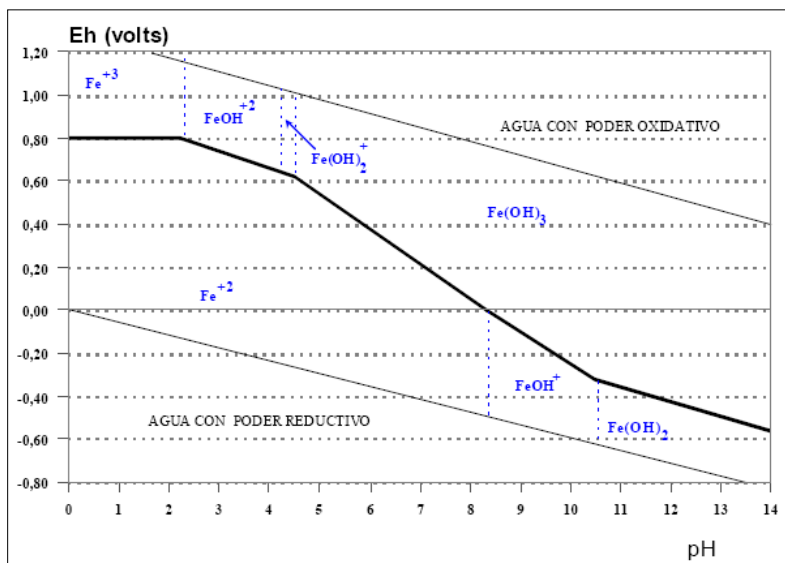


Figura 3. Distribución de las especies de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Simeonova y colaboradores, 2006).

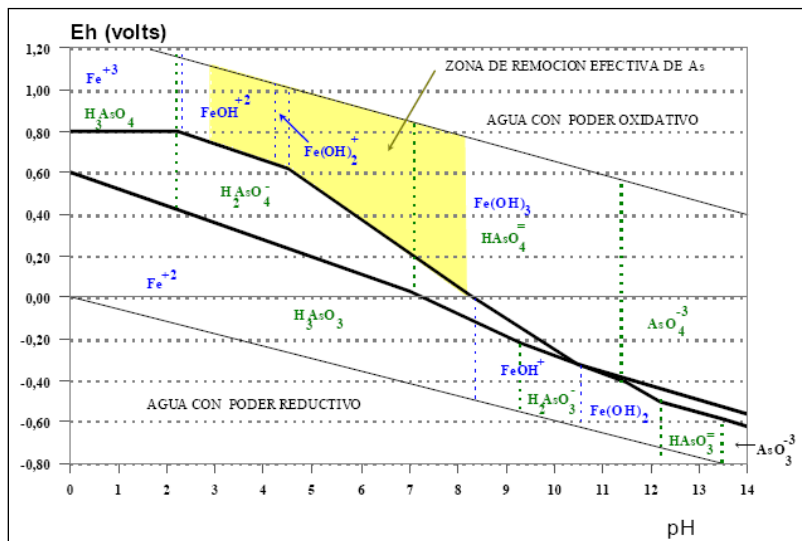


Figura 4. Movilidad de arsénico en presencia de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Simeonoca y colaboradores, 2006).

2.5.1. Influencia del hierro natural.

Normalmente, de forma natural en el agua subterránea los niveles de hierro presentan concentración insuficiente no se encuentran en el estado de valencia adecuado para remover el arsénico, (Mahin y colaboradores, 2008).

El hierro en el agua subterránea se encuentra en el estado Fe^{+2} y el arsénico en estado As^{+3} , para que se produzca las reacciones químicas es necesario que el hierro se oxide de Fe^{+2} a Fe^{+3} , permitiendo que el arsénico se oxide de As^{+3} a As^{+5} que es más fácil remover que el anterior, (Mahin y colaboradores, 2008).

El mecanismo de reacción entre el arsénico y el hierro es un proceso catódico, o sea, de reducción del arsénico que ocurre, gracias a los electrones que surgen de la reacción anódica del hierro, (Campos, 2003).

2.5.2. Influencia de los Fosfatos.

Niveles significativos de fosfatos son encontrados de forma natural en el agua subterránea en algunas regiones contaminadas con arsénico, el que puede potencialmente reducir la eficiencia de ciertos tratamientos basados con el hierro. Iguales condiciones que favorecen la desorción del arsénico de la oxidación de metal asociados con sedimentos a menudo favorecen los altos niveles de fosfatos, (Mahin y colaboradores, 2008).

Los resultados del análisis de la proporción de hierro y fosfato en el agua subterránea puede ser un buen indicador de la eficacia del sistema de remoción de arsénico basado en hierro en zonas con alto nivel de arsénico, (Mahin y colaboradores, 2008). Bajo ciertas condiciones (alto pH y/o bajo Fe^{+2}), el fosfato puede interferir con la remoción de arsénico del agua para consumo humano en sistema de remoción a base de hierro, (Meng y colaboradores, 2002; BCSIR, 2003; Tyrovola y colaboradores, 2006; Roberts y colaboradores, 2004; Su y Puls, 2001).

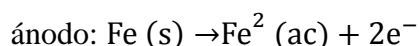
Generalmente los tres parámetros más importantes para analizar el contenido de arsénico en pozos son (1) hierro total, (2) fosfatos y (3) pH. En el caso del fosfato los análisis de

laboratorio debe reportar resultados de fosfato (PO_4), fosfato como P ($\text{PO}_4\text{-P}$) o fósforo (P), (Mahin y colaboradores, 2008).

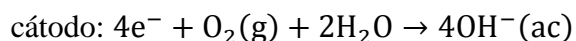
Pruebas de campo en Bangladesh de 5 tecnologías para remover arsénico revelaron que todas presentaron pobre desempeño en área con elevado pH (7,5 - 8) y niveles de fosfato PO_4 alrededor de 10 mg/l, el cual es equivalente a aproximadamente a 3 mg/l de $\text{PO}_4\text{-P}$, (BCSIR, 2003).

2.5.3. La corrosión del hierro.

El proceso mismo es de naturaleza electroquímica. La corrosión del hierro ocurre sólo en presencia de oxígeno y agua. Sobre una parte de la superficie del objeto de hierro tiene lugar la oxidación, (Mortimer Ch. E., 1990).



En otro sitio de la superficie tiene lugar la reducción, involucrando $\text{O}_2(\text{g})$ y H_2O .



Por lo tanto, en efecto se establece una pila voltaica en miniatura. Los electrones producidos en la región anódica se mueven a través del hierro hacia la región catódica.

Los cationes, iones de Fe^{+2} , producidos en el ánodo, se mueven a través del agua sobre la superficie del objeto hacia el cátodo. Los aniones, iones de OH^{-} , producidos en el cátodo, se mueven hacia el ánodo. En alguna parte entre estas dos regiones, se encuentran los iones y forman $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Sin embargo, el hidróxido de hierro (II) no es estable en presencia de humedad y oxígeno. El hidróxido se oxida a hidróxido de hierro (III), el que en realidad es un hidrato de óxido de hierro (III), $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ o hierro corroído, herrumbroso.

Los sitios donde un objeto corroído de hierro adquiere picaduras, son las regiones: anódicas donde el hierro se disuelve como iones de Fe^{+2} . Las regiones catódicas son aquellas que están más expuestas a la humedad y al aire, puesto que el $\text{O}_2(\text{g})$ y el agua están involucrados en la reacción catódica. La herrumbre siempre se forma en los puntos algo

distanciados de aquellos donde ocurre la excoiación (entre las regiones anódicas y catódicas). La corrosión misma se forma en sitios entre estas dos regiones, generalmente, más cerca de la región catódica que de la anódica- la transformación del $\text{Fe}(\text{OH})_2$ en herrumbre requiere $\text{O}_2(\text{g})$ y H_2O .

2.6. Filtración lenta de arena.

Es un proceso natural que se desarrolla en forma natural, sin la aplicación de sustancias químicas, pero requiriendo de un buen diseño así como de una apropiada operación y cuidadoso mantenimiento para no reducir la eficiencia del filtro lento, (Van y colaboradores, 1978).

La filtración lenta (o filtración biológica) se consigue al hacer circular el agua cruda a través de un manto poroso, usualmente arena. Durante el proceso, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente proceso de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta su subsecuente retiro o limpieza.

En los poros o espacios vacíos del medio filtrante (los cuales constituyen aproximadamente el 40 % del volumen), se desarrolla un activo proceso de sedimentación, fenómeno que se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas.

Etapas de remoción del proceso de filtración: transporte y adherencia. Una vez que la partícula se ha adherido a la superficie del grano de arena, la película biológica que envuelve a estos puede metabolizar los contaminantes orgánicos, produciendo una remoción permanente a través del mecanismo biológico.

2.6.1. Mecanismo de transporte.

En esta etapa de remoción básicamente hidráulica, ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre una colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos mecanismos son:

intercepción, sedimentación y difusión. Para comprender estos mecanismos, hay que considerar primero la forma en que el fluido se comporta alrededor de un grano de arena considerado como una obstrucción.

Si una partícula es llevada por las líneas de flujo, puede colisionar con un grano de arena, adherirse a él y de este modo ser removida.

Cernido: El mecanismo de cernido actúa exclusivamente en la superficie de la arena y solo aquellas partículas de tamaño mayor que los intersticios de la arena. Su eficiencia es negativa para el proceso porque colmata rápidamente la capa superficial, acortando las carreras de filtración.

Los sólidos grandes, especialmente material filamentoso como las algas clodoferas, forman una capa esponjosa sobre el lecho que mejora la eficiencia del cernido, actuando como un pre filtro sobre el lecho de arena, protegiéndolo de una rápida colmatación y permitiéndole cumplir con su función de filtración a profundidad.

Intercepción: Es una de las formas en que las partículas pueden colisionar con los granos de arena. La intercepción solamente puede ocurrir si una partícula es conducida mediante una línea de flujo muy cerca del grano de arena, de modo que roce la superficie de este. Cuanto más grande es la partícula, será más factible que ocurra la intercepción.

Sedimentación: La fuerza de gravedad actúa sobre todas las partículas, produciendo la componente vertical de la resultante de la velocidad de conducción, la cual puede causar la colisión de la partícula con el grano de arena. Su influencia es perceptible solamente con partículas mayores de $10\mu\text{m}$, (Yao, 1971).

Difusión: Es el tercer mecanismo de transporte representativo en la filtración lenta. La energía térmica de los gases y líquidos se pone de manifiesto en un movimiento desordenado de sus moléculas. Cuando esas moléculas colisionan con una pequeña partícula, esta también empieza a moverse en forma descontrolada, en una serie de pasos cortos, a menudo denominados de “andar desordenado”.

Si la partícula es conducida por las líneas de flujo, la difusión puede cambiar su trayectoria, moviéndose de una línea de flujo a otra, pudiendo eventualmente colisionar con un grano de arena. Como se puede inferir, cuanto más baja es la velocidad del flujo, mas pasos podrá dar la partícula por una unidad de tiempo. Por lo tanto, la velocidad intersticial decrece. Así mismo, a medida que la temperatura se incrementa, aumenta también la energía térmica y, por consiguiente, el número de pasos por unidad de tiempo y la probabilidad de colisión. La difusión es un mecanismo muy importante con partículas de tamaño menor a $1\mu\text{m}$, (Yao, 1971).

Flujo intersticial: En una porción de lecho filtrante con muchos granos de arena, las líneas de flujo tienen una configuración tortuosa. Por definición, el flujo entre dos líneas cualesquiera de corriente es similar y el espacio dentro del cual discurren se denomina conducto cilíndrico. La configuración de estos conductos cilíndricos es tortuosa: se bifurcan, se unen y se vuelven a bifurcar en diferentes puntos. Este continuo cambio de dirección del flujo crea mayor oportunidad de colisión, al cruzarse constantemente las partículas y los granos de arena.

Si una partícula es conducida por las líneas de flujo intersticial, será más probable que en cualquier punto, durante su paso entre los granos de arena, choque contra uno de ellos. La posibilidad de chocar dentro de un tramo dado de su trayectoria depende de la dimensión de los granos de arena, de la velocidad intersticial y de la temperatura. Cuanto más pequeño los granos de arena, mayor probabilidad de colisión. La porosidad del medio es mayor y por lo tanto, hay mayor cantidad de conductos, produciéndose mayor número de bifurcaciones. Así mismo, cuanto más baja la velocidad intersticial, mayor posibilidad de colisionar. Las velocidades más bajas permiten mayor oportunidad de colisión por unidad de distancia con el mecanismo de difusión. Sin embargo, a medida que la velocidad intersticial se incrementa, hay un punto por encima del cual la velocidad ya no influye aunque siga aumentando. Finalmente las temperaturas altas intensifican el mecanismo de difusión, produciéndose una mayor probabilidad de colisión.

Probabilidad de colisión: Todo el análisis efectuado hasta ahora está estrechamente relacionado con la oportunidad de colisión entre una partícula y un grano de arena, expresado mediante el coeficiente (η). El número de colisiones por unidad de desplazamiento determina el potencial de remoción mediante la filtración. La remoción final dependerá de que se produzca la adherencia.

2.6.2. Mecanismo de adherencia.

Mientras no se produce la adherencia, no hay remoción. La fracción de partículas que se adhieren en relación con el número de colisiones, por definición es el coeficiente α . Investigaciones al respecto sugieren que el desarrollo de la película biológica proporciona a los granos de arena una superficie absorbente que favorece la adherencia. Otra suposición, es que las enzimas extracelulares coagulan las partículas, permitiendo así la adherencia. Se desconoce en qué situaciones aumenta o disminuye el valor de α .

Cuando el filtro comienza a funcionar, antes de que se desarrolle la película biológica, la remoción de coliformes es cercana a cero y, por lo tanto, $\alpha=0$, (Bryck y colaboradores, 1987). Después de que la película biológica se ha desarrollado, la tasa de remoción es del orden de 2 a 4 logaritmos, encontrándose el coeficiente α cercano a 1. Esto indica la importancia de la película biológica en la eficiencia del filtro lento. Los microorganismos pueden morir o ser ingeridos por los depredadores, antes de que logren alcanzar una superficie absorbente. Por lo tanto, la remoción indicada puede deberse a muerte o predación adicional a la adherencia. Sin embargo, luego de producida la adherencia, ocurrirá inevitablemente la predación y la muerte.

El filtro se considera maduro cuando la película biológica ha llegado a su máximo desarrollo para las condiciones existentes. El límite máximo de desarrollo de la película biológica no está aun definido, necesitándose mayor investigación al respecto para obtener esta importante información.

No obstante, investigaciones realizadas por (Bellamy y colaboradores, 1985): Bryck, 1987: Barret, 1989, han demostrado que el límite máximo de desarrollo de la capa biológica, se relaciona con el contenido de nutrientes en el agua.

Puede esperarse que los filtros lentos que tratan aguas con bajo contenido de nutrientes, presenten una remoción de coliformes fecales de 2 log, después de producirse la maduración de la película biológica, (Bellamy y colaboradores, 1985). En cambio, con aguas ricas en nutrientes, es de esperar que se obtenga remociones del orden de 3 log, (Bellamy, 1985), evidenciándose en otros casos eficiencias de remoción de hasta 4 log, (Barret, 1989).

2.6.3. Mecanismo biológico.

La remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto tanto del mecanismo de adherencia como del mecanismo biológico.

Al iniciarse el proceso, las bacterias transportadas por el agua pueden multiplicarse en forma selectiva, contribuyendo a la formación de la película biológica del filtro y utilizando como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica.

Las bacterias oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de esta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta son convertidas en materia viva. Los productos de desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores para ser utilizados por otros organismos.

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y es acompañado de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así sucesivamente. De este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua cruda, es gradualmente descompuesta en agua, bióxido de carbono y sales relativamente inocuas, tales como sulfatos, nitratos, y fosfatos (proceso de mineralización), los cuales son descargados en el efluente de los filtros.

La actividad bacteriológica descrita es más pronunciada en la parte superior de lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de alimento. Cuando se limpian las capas superiores del filtro, se remueven las bacterias, siendo necesario un nuevo período de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la actividad bacteriológica necesaria. A partir de los 0,30m a 0,50m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración); en cambio, se realizan reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica (tales como aminoácidos) en amoníaco, y a los nitritos en nitratos (nitrificación).

2.6.4. Pérdida de carga.

La pérdida de carga en el filtro lento de arena se produce al atravesar el caudal de operación, la película biológica y el lecho de arena en toda su profundidad. A medida que progresa la carrera del filtro, se desarrolla el *schmutzdecke* y se incrementa la resistencia hidráulica causante de la mayor parte de la pérdida de carga.

La remoción del *schmutzdecke*, usualmente mediante alguna forma de raspado en los filtros pequeños, permite que la pérdida de carga recobre el nivel de lecho filtrante limpio. Generalmente, la pérdida de carga en el lecho limpio es de 10cm aproximadamente, dependiendo este valor de la tasa hidráulica de diseño, de la temperatura y de las características del lecho de arena.

2.7. Tecnologías domiciliar para remover arsénico.

La revisión bibliográfica indica que existen una variedad de dispositivos que han sido comprobado su eficiencia o están siendo desarrollados para remover arsénico a nivel domiciliar a base de hierro, las más conocidas son ALUFLOC, FH, jabones de hierro, virutas de hierro, congelación natural, A/M PB/13, Arena con óxido de hierro, 2-Kolshis, 3-Kolshis, SONO filter y filtro KANCHAN, (Torres, 2006). En esta sección se describen las principales características a tomar en cuenta para la selección de una tecnología para

proyectos de remoción de arsénico a nivel familiar y se aborda el funcionamiento de la tecnología de los filtros **KANCHAN™** y **SONO filter** que se aplicaron en la investigación.

2.7.1. Debilidades y fortalezas de tecnologías existentes.

Según Torres, 2006, lo principal de una tecnología que produce agua de consumo humano es que esta agua sea de calidad. El sistema es para abastecer a una familia, con lo cual se le exige además que ofrezca una cantidad adecuada. El sistema tiene que ser robusto, capaz de aguantar pequeñas variaciones de condiciones sin suponer cambios significativos en los resultados de la operación del sistema. Las tecnologías han de ser usadas en las casas y por gente no altamente calificada a nivel técnico, por lo tanto es de suma importancia que sea sencillo de operar. Finalmente, las tecnologías no pueden tener efectos adversos en el medio ambiente.

2.7.1.1. Calidad.

El objetivo principal de estas tecnologías, es la remoción de arsénico, pero hay muchos otros aspectos técnicos que hay que considerar para poder cualificar a estas tecnologías. A parte de la remoción de arsénico, es importante conocer si remueve otros componentes como pueden ser el hierro, el manganeso, la turbiedad, los sólidos suspendidos, etc. También, es de vital importancia conocer su poder de remoción bacteriológica, ya que sin ella el agua sigue estando contaminada, con efectos en salud a corto plazo. Otros aspectos como el olor, sabor y color juegan un papel importante en la parte de aceptación de la tecnología, por parte de la población, aunque no tengan problemas de toxicidad asociados. La generación de lodos tóxicos, aguas de lavado de filtros, o medios de filtrado, con elevados contenidos de arsénico también, es relevante, aunque no existen hoy día técnicas para tratarlos *in-situ*, hay que disponerlos en algún sitio o llevarlos a un centro especializado de residuos tóxicos para que los traten, (Torres, 2006).

Tabla 2. Eficiencia de remoción de contaminantes, según tecnología. (Fuente: Torres, 2006).

Sistema de tratamiento	Eficiencia de Remoción					
	As	Bacteriológica		Turbidez		Puntuación
		Bibliográfica	Estimada	Bibliográfica	Estimada	
ALUFLOC	Alta	+		+		5
RAOS	Media	+		+		4
Jabones de hierro	Alta	?	-	?	+	4
Virutas de hierro	Alta	?	+	+		5
A/M BP/13	Alta	?	+	?	+	5
Arena con óxidos de hierro	Media	?	+	+		4
2-Kolshis	Alta	+		+		5
3-Kolshis	Alta	?	+	+		5
AKF	Alta	+		+		5
NOTA: Alta: 60 %-90 %; Media: 40 %-60% y Baja: 0 %-40 %. Puntuación: Alta:3; Media:2; Baja:1 y el resto: +=1, -=0						

A excepción de la tecnología RAOS y la de revestimiento de arena con óxidos de hierro, todas las tecnologías presentan una alta eficiencia de remoción, Torres, 2006.

2.7.1.2. Cantidad.

Un factor clave en la aceptación por parte de la población de la tecnología, es que la cantidad de agua tratada sea suficiente para su abastecimiento. El agua doméstica es usada para beber, cocinar, preparar alimentos, baño, saneamiento y otras actividades de la casa. El agua para el consumo, para cocinar y para preparar alimentos necesita estar libre de contaminación bacteriológica y química, generalmente se necesitan aproximadamente 7-10 litros por persona y día, (Johnston, 2001). Otros estudios lo ponderan en 20 litros por familia de 4-5 personas y día, (Esparza, 2005). En la tabla 3 se hace un resumen de las cantidades que ofrecen las distintas tecnologías.

Un dato muy importante, del que no se tiene información en las tecnologías que usan filtros, –a excepción de las virutas de hierro–, es el agua destinada a regenerar los medios filtrantes. La existencia de este dato podría modificar de forma significativa la cantidad de agua obtenida para cada una de las tecnologías que usan filtros.

Tabla 3. Cantidades de agua obtenida según tecnología. (Fuente: Torres, 2006).

	Volumen (L)		¿Regeneración?	puntuación
	Bibliografía	Estimada		
ALUFLOC	20		No	4
RAOS	2*		No	4
Jabones de hierro	2*		No	4
Virutas de hierro	25		Si	3
A/M BP/13	?	20	No	4
Arena con óxidos de hierro	?	20	Si	3
2-Kolshis	20		Si	3
3-Kolshis	?	20	Si	3
AKF	20		Si	3
*se pueden poner tanta botellas de 2 litros como sean necesarias.				

2.7.1.3. Robustez.

De acuerdo a la capacidad de aguantar pequeños variaciones sin esperar cambios significativos que pongan en riesgo los resultados del sistema ni para el que lo maneja se realiza la puntuación de las tecnologías.

Tabla 4. Resumen de la robustez de las tecnología. (Fuente: Torres, 2006).

	Robustez	puntuación
ALUFLOC	Bajo mantenimiento, influencia del usuario en la remoción.	4
RAOS	Bajo mantenimiento, influencia del usuario en la remoción.	4
Jabones de hierro	Bajo mantenimiento, influencia del usuario en la remoción.	4
Virutas de hierro	Mantenimiento y regeneración periódica.	3
A/M BP/13		?
Arena con óxidos de hierro		?
2-Kolshis	Se puede romper, influencia del usuario. Regeneración.	2
3-Kolshis	Se puede romper. Regeneración.	3
AKF	Bajo mantenimiento. Regeneración.	4

2.7.1.4. Operación.

Se analiza el riesgo que corren los usuarios al operar con las distintas tecnologías. Algunas de ellas usan reactivos químicos para la remoción del arsénico. Hay que poner especial

atención durante la aplicación de estos productos químicos para no exponer a los miembros de la familia, en especial a los niños. En la tabla que sigue podemos ver los riesgos asociados a cada tecnología.

Tabla 5. Riesgos operacionales de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).

	riesgo operacional	puntuación
ALUFLOC	Posible exposición de los usuarios a reactivos químicos agresivos.	4
RAOS	No riesgos operacionales para los usuarios.	5
Jabones de hierro	No riesgos operacionales para los usuarios.	5
Virutas de hierro	No riesgos operacionales para los usuarios.	5
A/M BP/13	Posible exposición de los usuarios a reactivos químicos agresivos.	4
Arena con óxidos de hierro	No riesgos operacionales para los usuarios.	5
2-Kolshis	Posible exposición de los usuarios a reactivos químicos agresivos.	4
3-Kolshis	No riesgos operacionales para los usuarios.	5
AKF	No riesgos operacionales para los usuarios.	5

2.7.1.5. Impacto ambiental.

Las tecnologías de aplicación casera, es decir que no requieren grandes infraestructuras, el impacto que puedan tener será relativamente pequeño. En el caso del método RAOS y jabones de hierro tienen un impacto ambiental ligeramente positivo, ya que usan botellas de plástico que de otro modo podrían ser un residuo, están, en pequeña escala, reutilizando un material. Por otro lado, todas las tecnologías de remoción de arsénico tienen un impacto ambiental por su generación de residuos con alto contenido de arsénico. Estos residuos son: lodos; sedimentos con poco agua (aspecto lodoso), agua de lavado; aguas de lavado de los filtros y otros: materiales usados como filtros con el arsénico adherido.

Tabla 6. Impacto ambiental de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).

	impacto ambiental	puntuación
ALUFLOC	Pequeño impacto negativo por la generación de lodos.	4
RAOS	Pequeño impacto negativo por la generación de lodos y pequeño impacto positivo por la reutilización de botellas plásticas.	4
Jabones de hierro	Pequeño impacto negativo por la generación de lodos y pequeño impacto positivo por la reutilización de botellas plásticas.	4
Virutas de hierro	Pequeño impacto negativo por la generación de aguas de lavado.	3
A/M BP/13	Pequeño impacto negativo por la generación de lodos.	3

	impacto ambiental	puntuación
Arena con óxidos de hierro	Pequeño impacto negativo por la generación de aguas de lavado.	3
2-Kolshis	Pequeño impacto negativo por la generación de aguas de lavado.	3
3-Kolshis	Pequeño impacto negativo por la generación de aguas de lavado.	3
AKF	Pequeño impacto negativo por la generación de aguas de lavado.	3

2.7.1.6. Aspectos socioeconómicos.

a. Consideraciones económicas.

Los criterios económicos pueden ser decisivos al escoger la tecnología a implementar, no solamente el costo inicial sino los costos de operación, mantenimiento y reparación. Generalmente la población que está ubicada en zonas rurales no tiene muchos recursos económicos, y por lo tanto, este aspecto aún se vuelve más decisivo.

Está aceptado de forma general que los usuarios tengan que contribuir en los costos de implantación y mantenimiento en el tratamiento de agua en zonas rurales, sin el apoyo directo de los gobiernos. En Bangladesh del 97 % de la población que tiene acceso a agua sin patógenos, se estima que el 75 % de estos puntos de tratamiento han sido construidos por el sector privado, (Johnston, 2001).

Tabla 7. Costos anuales y de inversión de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).

	US\$ Inversión inicial por familia	US\$/año por familia	puntuación
ALUFLOC	5*	24	4
RAOS	5	<1	5
Jabones de hierro	5*	<1	5
Virutas de hierro	39,3	2,7	3
A/M BP/13	5*	2,8	5
Arena con óxidos de hierro	5*	5,7	4
2-Kolshis	16,7	9,7	4
3-Kolshis	5	4,6	5
AKF	15,73	2,4	4
Puntuación hipotética: 5=<US\$10; 4=US\$10-US\$30; 3=US\$30-US\$60; 2=US\$60-US\$100; 1=>US\$100			
*inversión inicial hipotética			

Un dato importante, que no se ha encontrado en la bibliografía, es el tiempo de vida útil de cada tecnología. Esto permitiría hacer una distribución de la inversión inicial durante el tiempo de vida útil para ver los costos reales de cada tecnología.

b. Tiempo de espera y dedicación.

En las comunidades rurales dónde no hay redes de distribución de agua potable, el poder acceder al agua potable pasa a ser tarea de los propios beneficiarios y deja de serlo de las administraciones. Generalmente son poblaciones que viven de trabajar en agricultura y ganadería, lo cual requiere mucho tiempo. Las mujeres y los niños suelen ser los responsables del agua, y de las tareas de la casa en general. A estas tareas se les añade el tratamiento del agua para poder eliminar la contaminación que esta contenga.

Un requisito para la tecnología aceptada será que esta no ocupe mucho tiempo, retrasando así otras tareas. Hay dos tipos de tiempo que hay que tener en cuenta: el tiempo que ocupa la metodología en sí para preparar el agua antes verterla al filtro, y el tiempo de espera para obtener el agua tratada.

Tabla 8. Tiempo de espera y metodología de las tecnologías. (Fuente: Torres, 2006).

	tiempo metodología (min)	tiempo espera (min)	puntuación
ALUFLOC	30	135*	4
RAOS	30	255	3
Jabones de hierro	10	0	5
Virutas de hierro	10	105	4
A/M BP/13	?	?	?
Arena con óxidos de hierro	10	195	3
2-Kolshis	240	720*	1
3-Kolshis	10	720*	1
AKF	10	75	4
Puntuación: 5=<60min; 4=60min-180min; 3=180min-360min; 2=360min-600min; 1=>600			
*media entre el tiempo mínimo y el máximo.			

c. Producción local de los materiales y adaptación de la tecnología a otros lugares.

Es muy importante que la tecnología a implementar no genere dependencias de la comunidad con otros países, o lugares nacionales excesivamente lejanos. Este hecho puede generar el abandono de la tecnología por su dificultad al intentar adquirir dichos productos, sobre todo si son de mantenimiento. Además esto puede provocar un alza de los costos por el transporte, y lo que se intenta es minimizarlos. Hay que tener en cuenta también que el hecho de que los materiales sean locales está beneficiando el desarrollo económico y productivo local.

Cada técnica será idónea, en cuanto a materiales, en el lugar en el que ha sido concebida, el problema surge cuando se intenta generalizar esta técnica sin investigar productos autóctonos del destino. Así lo idóneo sería transportar las ideas, pero buscar en cada lugar los materiales locales que pueden sustituir a los materiales que vienen definidos del país de origen.

Tabla 9. Resumen de uso de materiales autóctonos y adaptabilidad de las tecnologías.

(Fuente: Torres, 2006).

	Uso materiales autóctonos y adaptabilidad	puntuación
ALUFLOC	Ha demostrado adaptabilidad. Usa reactivos que hay que procesarlos industrialmente (químicos).	4
RAOS	Adaptable. Usa materiales caseros fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales. Dependencia climática.	4
Jabones de hierro	Adaptable. Usa materiales caseros fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales.	5
Virutas de hierro	Fácilmente adaptable. Materiales fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales	4
A/M BP/13	No se ha demostrado adaptabilidad. Usa reactivos que hay que procesarlos industrialmente (químicos).	3
Arena con óxidos de hierro	Fácilmente adaptable. Materiales fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales	4
2-Kolshis	No se ha demostrado adaptabilidad. Usa reactivos que hay que procesarlos industrialmente (químicos).	3
3-Kolshis	Fácilmente adaptable. Materiales fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales	4
AKF	Fácilmente adaptable. Materiales fáciles de encontrar en todas las comunidades rurales	4
*No se ha encontrado en la bibliografía existente casos de adaptación en otros países.		

No existe ninguna tecnología de aplicación universal. Ni ninguna tecnología que sea mucho mejor que las otras. Cada una de ellas tiene sus fortalezas y debilidades que pueden interesar o no, según la ubicación y condición.

La tecnología a aplicar depende sobre todo de la calidad del agua del lugar, de sus condiciones climáticas, de su ubicación geográfica, su geología, características de sus suelos, del tiempo que puedan/quieran invertir en ella, la aceptación por parte de la población beneficiaria y, sobre todo, de lo que esté dispuesto a pagar por ella los beneficiarios.

2.7.2. Características del filtro KANCHAN™.

El filtro de remoción de arsénico KANCHAN™ (KAF por sus siglas en ingles) evolucionó a partir del filtro BIOSAND, que fue desarrollado por el Dr. Manz de la Universidad de Calgary, Canadá. El KAF es un dispositivo de tratamiento de agua que remueve arsénico, patógenos, hierro, turbiedad, color y algunos otros contaminantes presentes en el agua de consumo humano, sobre la base de la filtración de arena lenta desarrollada en los años de 1820 en Escocia por Robert Thom y en Inglaterra por James Simpson y los principios de adsorción de hidróxido de hierro. Fue desarrollado por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en ingles) de EUA, Organización de la Salud Pública y Medioambiente (EMPHO por sus siglas en ingles) de Nepal, y el Programa de Apoyo para el suministro y tratamiento de agua en las comunidades del área rural (RWSSSP / por sus siglas en ingles) de Nepal. A nivel mundial ha sido merecedor de los premios MIT IDEAS 2002, Banco Mundial 2003, EPA 2005, Wall Street Journal Technical Innovation Award 2005-Categoría Medioambiente, entre otros, (Ngai y colaboradores, 2006).

Fue desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts en colaboración con ENPHO y RWSSSP de Nepal, basado en 7 años de investigación interdisciplinaria en laboratorios y estudios de campo en las comunidades rurales de Nepal, (Ngai y colaboradores, 2006). Existen cuatro configuraciones, (Walewijk y colaboradores, 2004): Concrete Square, Concrete Round, Plastic Hilltake y Plastic Gem505.

Estudios realizados en Nepal presentan que el KAF es un filtro efectivo para la remoción de arsénico, hierro como también patógenos, (Shrestha y colaboradores, 2003). Basado en un estudio piloto, en Nepal en 2003, Ngai y Walewijk encontraron que el KAF puede ser efectivo removiendo arsénico en el (rango = 87 % a 96 %, media = 93 %), coliforme total (rango = 0 a > 99 %, media 59 %), *E. Coli* (rango = 0 a >99 %, media 64 %), y hierro (rango = >90 % a > 97 %, media > 93 %), (Ngai y Walewijk, 2003). A los usuarios les gusta por la alta tasa de filtración (rango = 4 a 23 L/hr, media 14 L/hr), simple operación, mantenimiento mínimo, así como por la claridad y buen sabor del agua tratada, (Ngai y Walewijk, 2003).

Las principales características del KANCHAN son los siguientes:

2.7.2.1. Remoción de arsénico.

Para la remoción del arsénico utilizando el KAF los clavos son oxidados al ser expuestos al aire y la humedad, produciéndose partículas de hidróxido de hierro férrico, quien es un excelente adsorbente del arsénico. En el proceso de adsorción, el arsénico es atraído hacia sitios de adsorción sobre la superficie de materiales sólidos como lo es el hidróxido de hierro. Los clavos de hierro oxidados actúan como medios de comunicación de adsorción. Los clavos complementan los niveles de hierro presentes de manera natural en el agua subterránea. Los altos niveles de hierro en el agua subterránea favorecen su eficiencia de remoción, (Ngai y colaboradores, 2006).

Cuando el arsénico entra en contacto con la superficie de los clavos oxidados ocurre una reacción de complejación, donde el arsénico es rápidamente adsorbido por el hidróxido de hierro. Las partículas de hierro cargadas de arsénico que se precipitan son atrapadas en los pequeños espacios entre las partículas de la arena con diámetro menor de 1 mm a unos pocos centímetros de la superficie, (Ngai y colaboradores, 2006).

2.7.2.2. Remoción de Patógenos.

Normalmente las aguas subterráneas contienen bajos niveles de contaminación por patógenos, tomando como indicador la no presencia de *E. Coli* o bacterias termotolerantes.

Ocasionalmente altos niveles de patógenos son el resultado de las malas prácticas de higiene y/o inapropiadas prácticas de extracción del agua de pozo. La remoción de los patógenos en el KAF es similar a un filtro de arena lento, el cuál consta principalmente de cuatro mecanismos generales: retención física, adsorción, depredación, y extinción físico-natural, (Ngai y colaboradores, 2006).

La retención física se refiere a entrapar las partículas físicas que son demasiado grandes para pasar los poros pequeños de la arena con diámetro menor de 1 mm. Este proceso puede quitar parásitos, quistes y bacterias más grandes. Algunas bacterias y virus son demasiado pequeños, por lo tanto, son retirados por otros medios, como depredación y adsorción, (Ngai y colaboradores, 2006).

La adsorción se refiere al proceso por el que las partículas extrañas son adsorbidas por otras partículas y por el medio filtrante, es decir la arena. Este proceso es afectado por una variedad de interacciones físicas entre células microbianas y el entorno poroso, incluyendo la hidrofobicidad (por ejemplo: la polaridad) y la carga eléctrica superficial, (Ngai y colaboradores, 2006).

Debido a la retención física de las partículas extrañas como tierra y sustancias orgánicas que son atrapadas en la cima de la capa de arena con diámetro menor de 1 mm, se forman una capa fina. Con el oxígeno disuelto y los nutrientes en el agua de influente, una población biológica (llamada Biofilm) crecerá dentro de la capa fina alrededor de cada grano de arena y en la cima a pocos centímetros de la arena con diámetro menor de 1 mm. La población está formada de algas, bacterias, protozoos e invertebrados pequeños. Cuando el agua contaminada por microbios es vertida en el KAF los organismos depredadores que residen en la capa de biofilm consumirán los agentes patógenos. El rendimiento de remoción de bacterias del KAF está todavía en investigación, (Ngai y colaboradores, 2006).

2.7.2.3. Remoción de hierro y turbiedad.

Las aguas subterráneas que contienen hierro normalmente toman un color naranja cuando entran en contacto con el oxígeno al ser bombeadas hacia la superficie ambiente. En el

filtro KAF la mayoría de las partículas de hierro son retenidas en los pequeños espacios entre las partículas de la arena con diámetro menor de 1 mm a unos pocos centímetros de la superficie. Además, el agua subterránea podría contener otras partículas de polvo finas en suspensión a veces (por ejemplo: turbiedad). Cuando esta agua es vertida en el filtro, la mayoría de las partículas de hierro y la turbiedad son atrapadas encima de la arena con diámetro menor de 1 mm por medios físicos. La investigación de campo por MIT y ENPHO indica que la remoción de hierro y turbiedad está entre 93 % - 95 % a más. Otros estudios independientes muestran que entre 90 % - 99 % de hierro y turbiedad pueden ser retirados, (Ngai y colaboradores, 2006).

La remoción de hierro es deseable porque la remoción eficaz de hierro es una condición indispensable, para la remoción eficaz de arsénico. Por lo tanto, si el hierro es encontrado en el agua filtrada, entonces es muy probable que el arsénico sea encontrado también, (Ngai y Walewijk, 2003).

2.7.2.4. Tasa de Filtración.

La tasa de filtración del KAF es de 15-20 L/horas. Una tasa de filtración más alta (30 L/horas) puede comprometer la eficiencia de remoción del arsénico, hierro, patógenos y turbiedad. Una tasa de filtración baja (menor de 5 L/horas) puede ser un inconveniente para el usuario. La Organización Mundial de la Salud recomienda como mínimo 7,5 L/por persona/día para la salud básica y la higiene. Un filtro KAF que funciona durante 12 horas por día en 15 L/horas puede proveer agua suficiente (180 L) para una familia de 24 personas, (Ngai y colaboradores, 2006).

2.7.2.5. Filtración Lenta en la remoción de arsénico.

En los filtros las máximas concentraciones de hierro son encontradas en la superficie de la arena con diámetro menor de 1 mm, es decir en la superficie, (figura 6). Esto es probablemente debido a que las partículas son incapaces de entrar en los pequeños espacios de la capa de arena fina. En las profundidades inferiores de la capa de arena las concentraciones de hierro son estables a valores similares, solo con pequeñas fluctuaciones

atribuidas a las concentraciones de hierro natural de la arena o errores de laboratorio, (Ghimire, 2005).

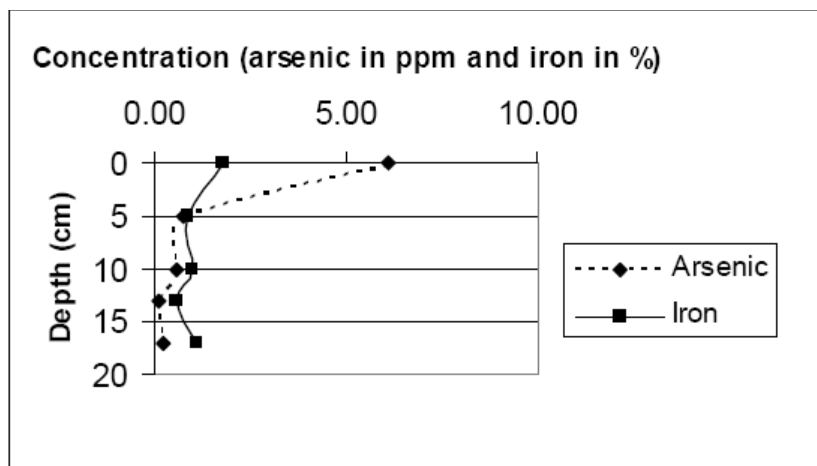


Figura 5. Profundidad de la capa de arena vs. Concentración de hierro (%) y concentración de arsénico (ppm). (Tomado de Ghimire, 2005).

Las máximas concentraciones de arsénico en la capa de arena son encontradas en la superficie. La máxima concentración de arsénico es atrapada en la superficie de la capa de arena, probablemente debido a que las partículas son incapaces de entrar en los pequeños espacios de la capa de arena fina. Las concentraciones de arsénico disminuyen en las profundidades inferiores de la capa de arena, siendo estables a valores similares, solo con pequeñas fluctuaciones atribuidas a las concentraciones de arsénico natural de la arena o errores de laboratorio, (Ghimire, 2005).

Mayormente, la proporción de hierro-arsénico es alto en la superficie de la arena y baja en las profundidades inferiores de la arena. La alta proporción de hierro-arsénico sugiere que el arsénico adsorbido por las partículas de hierro es atrapado en la superficie de la arena sin penetrar en las profundidades inferiores, (Ghimire, 2005).

a. Tamaño y distribución del grano.

Las propiedades físicas de la arena, a saber, tamaño y distribución del grano, porosidad y permeabilidad no permiten que las partículas de hierro y arsénico penetren en la capa de

arena fina. Para el KAF la arena fina tiene que ser menor de 1 mm, arena media entre 3 mm – 6 mm y grava entre 6 mm – 15 mm, (Ghimire, 2005).

b. Porosidad.

Para el KAF la arena debe estar completamente saturada de agua. Una porosidad arriba de 36 %, es decir, de 100mL de arena, 36mL debe estar ocupada por agua, (Ghimire, 2005).

c. Permeabilidad.

Para el KAF la permeabilidad determinada debe ser de $3,61 \cdot 10^{-2}$ según formula de Allen Hazen, $2,22 \cdot 10^{-2}$ de acuerdo a la ecuación de Kozeny-Carman y $4,74 \cdot 10^{-2}$ de acuerdo a Ley de Darcis, (Ghimire, 2005).

2.7.3. SONO filter.

El SONO filter MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935, 2002 fue desarrollado en 16 distritos de Bangladesh. El arsénico se remueve por el fenómeno de adsorción, por medio de un proceso de transferencia de masa, donde una sustancia es trasformada desde la fase liquida a la superficie de un sólido, quedando atrapada por fuerzas físicas y químicas. Fue patentado en 2002 por la Agencia Internacional de Energía Atómica y es un predecesor del sistema 3-Kolshi, quien tiene capacidad de remover hasta 20 µg/L de arsénico, (Hussam y Munir, 2007).

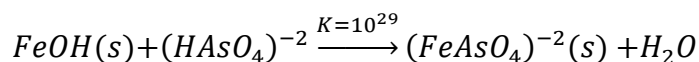
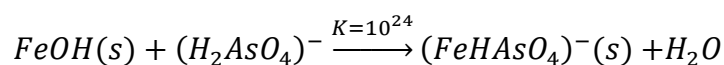
El sistema de filtración del SONO filter fue probado extensivamente y verificado su tecnología por varios proyectos ejecutados por el Gobierno de Bangladesh. Elimina el arsénico (III) del agua subterránea sin un tratamiento químico previo, obteniendo agua baja en calcio y hierro por lo tanto el sabor es agradable al beber, (Hussam y colaboradores, 2007).

Los SONO filter adsorben el arsénico a menos de 10 µg/L con un rango de entrada de 32 µg/L hasta 2423 µg/L de arsénico total. La matriz del compuesto de hierro (CIM) en combinación con la arena, el carbón de leña y un arreglo optimo de los materiales, permite

que el SONO filter remueva arsénico, hierro, manganeso y mucha otras especies inorgánicas, (Hussam y colaboradores, 2007).

No requiere operación y mantenimiento especial con excepción del reemplazo de la capa superior de la arena, cuando el flujo de agua disminuye, teniendo una vida útil el filtro de 5 años, es decir un uso continuo, (Hussam y colaboradores, 2007).

El SONO filter quita las especies de arsénico principalmente por las reacciones de complejación en la superficie de una matriz férrica compuesta, especialmente fabricada (CIM, por sus siglas en ingles), (Hussam y colaboradores, 2007), estas son las reacciones:



El filtro no necesita la aplicación de productos químicos, no se regenera, ni produce residuales tóxicos y produce diariamente entre 20-30 L/hora de agua tratada, suficiente para las necesidades de tomar y cocinar de 1-2 familias, (Hussam y colaboradores, 2007).

En agua subterráneas con pH entre 6,5-7,5 el arsénico está presente en dos estados de oxidación arsénico (III) en H_3AsO_3 y arsénico (V) en $(H_2AsO_4)^-$, $(HAsO_4)^{-2}$. El SONO filter fue desarrollado para remover las tres especies de arsénico anteriores, dado que en la mayoría de las fuentes de agua subterráneas de Bangladesh se encuentra en un 50 % la especie H_3AsO_3 y el otro 50 % se divide entre $(H_2AsO_4)^-$ y $(HAsO_4)^{-2}$, (Hussam y Munir, 2007).

2.7.3.1. Materiales y funciones características del SONO filter.

Una lista de los materiales básicos y funciones características del SONO-FILTER MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935,2002 se detallan en la tabla siguiente, (Hussam y Munir, 2007).

Tabla 10. Especificaciones generales de los materiales usados en SONO filter, función y construcción.

Material	Funciones y características	Método de construcción y disponibilidad
Especificaciones generales del filtro: Balde superior: 45 L, diámetro: 46 cm / 44 cm, peso: 1,5 kg; Balde inferior: 33 L, diámetro: 38/36, peso: 1 kg. Dimensión: Altura/peso/largo: 1,22/0,42/0,45 metros, peso total 56 kg. Tasa de flujo: 20-30 L/h continuos.		
Balde superior (32 kg).		
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg. Composición (1,5 kg - 2 kg, 95 % SiO ₂ , 5 % otros metales oxidados).	CRS es un material inactivo usado como medio para retener partículas, dispersar, estabilizar flujo y proveer estabilidad mecánica. En aguas subterráneas con alto contenido de hierro soluble en este medio es oxidado y precipitado como Fe(OH) ₃ soluble.	CRS es obtenido de ríos locales y deber ser lavado antes de usar.
Matriz compuesta de hierro (CIM) 5 kg - 10 kg Composición (Fe 92 % - 94%, C 4 % - 5 %, SiO ₂ 1 % - 2 %, S, P 1 % - 2 %).	CIM es una superficie activa donde se da la complejación e inmovilización del arsénico inorgánico y otros metales cationicos tóxicos. Es un producto poroso que con el uso se vuelve más encendido y produce partículas menos finas para la estabilidad del filtro.	CIM es fabricado de hierro. Primeramente son fuertemente lavados, secados y tratados con ácidos de calidad para romper la formación HFO en una matriz de hierro férrico.

Material	Funciones y características	Método de construcción y disponibilidad
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg, y trozos de ladrillo (BC: Sílice 55 %, Aluminio 30 %, Oxido de hierro 8 %, Magnesio 5 %, Limo 1 % y otros materiales 1 %) 2,5 kg.	CRS y BC son un material inactivo con similar función. La combinación de ambos materiales es usado como protección y permitir el libre flujo hacia los tubos de salida.	Son obtenidos localmente y deben ser lavados y desinfectados antes de usar.
Balde inferior (25 kg.)		
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg.	Similar a la anterior. En este medio se retiene el hierro residual del CIM que precipita en forma de HFO. El período de vida del filtro puede ser estimado por el hierro residual que precipita del balde superior.	Similar al anterior.
Carbón de madera (WC).	WC es conocido por adsorber sustancias orgánicas (componentes que causan mal olor, residuos de plaguicidas, etc.). WC es pasivo frente al arsénico pero es importante para obtener agua de beber de mejor calidad.	WC es obtenido del carbón usado para cocinar. Es obtenido en mercados y ventas locales.
Arena de río fina (FRS) 9 kg, y trozos de ladrillo (BC) 3,5 kg.	FRS es un medio de filtración que retiene las partículas más finas. BC son usados para estabilizar el flujo en el medio.	Ambos son obtenidos localmente y deben ser bien lavados antes de usar.

Material	Funciones y características	Método de construcción y disponibilidad
Otros materiales.		
Balde de plástico de 40 L.	Baldes contenedores. Son usados balde de plástico polipropileno de alta densidad.	Obtenidos localmente en mercados y ventas. Los baldes son con tapa, el inferior debe admitir la colocación de la llave reguladora de flujo.
Control de flujo.	El control de flujo mantiene el tiempo de residencia para obtener una óptima remoción de arsénico. Estos traen especificaciones de fábrica.	Estos accesorios se encuentran en plástico y metal en ferreterías locales.
Estante metálico.	Soporta los baldes.	Puede ser hecho localmente.

Fuente: Hussam y Munir, 2007.

2.7.3.2. Mecanismo de remoción del arsénico.

El principal material activo en el SONO filter es el CIM, el cual es una masa hecha de hierro, a través de un proceso que permite mantenerla activa y estable durante años. El CIM remueve arsénico cuantitativamente, a través de posibles reacciones químicas presentadas en la tabla 11. El Espectroscopio Infrarrojo (IRS) y los Rayos X para absorción extendida de partículas finas (EXAFS), evidencian que el arsenato y arsenito tienen forma BIDENTADA y superficie binuclear que le permite formar complejos con el FeOH ó Fe(OH)₃ (hidróxido férrico), donde la especie predominante es fuertemente inmovilizada en la superficie del hierro, (Hussam y Munir, 2007).

Las especies de arsénico (III) son oxidadas a especies de arsénico (V) por el oxígeno activo O_2^- el cual es producido por oxidación del hierro soluble Fe(II) con oxígeno disuelto, (Hussam y Munir, 2007).

Autor: Ariel Aragón González.

Tabla 11. Posibles reacciones fisicoquímicas en diferentes partes del proceso de filtración en el SONO filter, (Tomado de Hussam y Munir, 2007).

Sitio de reacción	Reacción
Capa superior: Oxidación de arsénico(III) (Ecuaciones son balanceadas por reacción de especies).	$As(III) + O_2^- \rightarrow As(IV) + H_2O_2$ $As(III) + CO_3^- \rightarrow As(IV) + HCO_3^-$ $As(III)OH^- \rightarrow As(IV)$ $As(IV) + O_2^- \rightarrow As(V) + O_2^-$
Superficie del Balde: Oxidación del hierro soluble. (Oxidación de ferroso a férrico a través de especies de oxígeno activo).	$Fe(II) + O_2 \rightarrow Fe(III)OH_2^+$ $Fe(II) + O_2^- \rightarrow Fe(III) + H_2O_2$ $Fe(II) + CO_3^- \rightarrow Fe(III)HCO_3^-$
CIM: Hidróxido férrico (HFO) Fe (III) complejación y precipitación.	$FeOH(s) + Fe(III) + 3H_2O$ $\rightarrow Fe(OH)_3(s) + FeOH(s, HFO)$ $+ 3H^+$ $FeOH(s) + 3H^+ \text{ es superficie de hierro hidratado}$
CIM-HFO superficie. Superficie de complejación y precipitación de especies de arsénico (V).	$FeOH(s) + AsO_4^{-3} + 3H^+$ $\rightarrow FeH_2AsO_4(s) + H_2O(s, FeOH)$ $+ AsO_4^{-3} + 2H^+$ $\rightarrow FeHASO_4^-(s) + H_2O(s, FeOH)$ $+ AsO_4^{-3} + H^+$ $\rightarrow FeAsO_4^{-2}(s) + H_2O(s, FeOH)$ $+ AsO_4^{-3} \rightarrow FeOHAsO_4^{-3}(s)$
En los dos Baldes: Precipitación de otros metales. (Precipitación del arsenato con otros iones de metales solubles).	$M(III) + HASO_4^{-2}$ $\rightarrow M_2(HAsO_4)_3(s), M(s, Fe), Al, M(II)$ $+ HASO_4^{-2}$ $\rightarrow M(HAsO_4)(s) \text{ y otros arsenatos}$ $M(s, Ba), Ca, Cd, Pb, Cu, Zn \text{ y otras trazas de metal}$

Sitio de reacción	Reacción
CIM y el medio filtrante de Arena. La reacción de la superficie del hierro con la arena produce una estructura solida porosa con un buen mecanismo de estabilidad para el filtro conocida como Solido CIM.	$FeOH + Si(OH_4) \rightarrow FeSiO(OH)_5(s) + H_2O$ $FeOH(s) + Si_2O_2(OH)_5^- + H^+ \rightarrow (s)FeSi_2O_2(OH)_5(s) + H_2O$ $FeOH(s) + Si_2O_2(OH)_5^- \rightarrow (s)FeSi_2O_3(OH)_4^-(s) + H_2O$ $FeOHasO_4^- + Al(III) \rightarrow (s)FeOHasO_4Al(s)$ $FeOHasO_4^{-3} + Fe(III) \rightarrow (s)FeOHasO_4Fe(s)$ $FeOH.HAsO_4^{-2} + Ca(II) \rightarrow (s)FeOH.HAsO_4Ca(s)$

Fuente: Hussam y Munir, 2007.

Cuando las especies de arsénico (V) ($H_2AsO_4^-$ y $HAsO_4^{-2}$) son removidas por la reacción superficial de complejación sobre la superficie del hierro hidratado $FeOH$ un nuevo $FeOH$ es generado en el sitio cuanto más agua es filtrada, (HUSSAM and MUNIR, 2007).

2.7.3.3. *Remoción de otros elementos en el agua.*

En combinación con el CIM, arena, carbón y un óptimo arreglo de los materiales, el SONO filter puede remover arsénico, hierro, magnesio y muchas otras especies inorgánicas presentes en el agua para consumo humano. En las pruebas realizadas en Bangladesh se obtuvo una remoción de menos de 10 µg/L de un rango de concentración encontrado de 32 µg/L – 2423 µg/L de arsénico total. El hierro soluble se removió por debajo de 0,26 mg/L de una concentración de hasta 21 mg/L, (Hussam y Munir, 2007). El material del CIM gastado y desechado no es tóxico porque el hierro-arsénico forma una masa sólida que no lixivia al subsuelo, (Hussam y Munir, 2007).

2.8. **Origen de la contaminación con arsénico en Nicaragua.**

Se ha estudiado la hipótesis de que el origen de la contaminación con arsénico del agua subterránea en Nicaragua, está influenciado por estructuras mineralizadas o alteradas hidrotermalmente en los alineamientos tectónicos paralelos a la depresión de Nicaragua. En

la zona de las Pilas y la Cruz de la India¹ predominan rocas ignimbríticas y dacíticas del Coyol Inferior (Tmci, Tmcd) cruzadas por un sistema de fallas con dirección NO-SE y NE-SO, (PIDMA/UNICEF, 2002). Tanto Las Pilas como Cruz de la India podrían ser ubicadas en el borde de una antigua caldera volcánica. Sin embargo, las altas concentraciones en arsénico no pueden explicarse por un aumento anómalo del gradiente geotérmico y no pueden correlacionarse únicamente con áreas hidro-geotermiales, (Barragne-Bigot, 2004).

En Las Pilas y Cruz de la India existen una buena correlación logarítmica entre el arsénico total y la temperatura del agua ($R=0,75$), es decir, el arsénico total es inversamente proporcional a la temperatura del agua. Las aguas de Las Pilas con un promedio de $30,3^{\circ}\text{C}$ son más calientes que las aguas de Cruz de la India, con un promedio de $28,4^{\circ}\text{C}$, y tienen un promedio de arsénico total de $2,7\mu\text{g/L}$ mientras las aguas de Cruz de la India presentan un promedio más alto de $16,6\mu\text{g/L}$, (Barragne-Bigot, 2004).

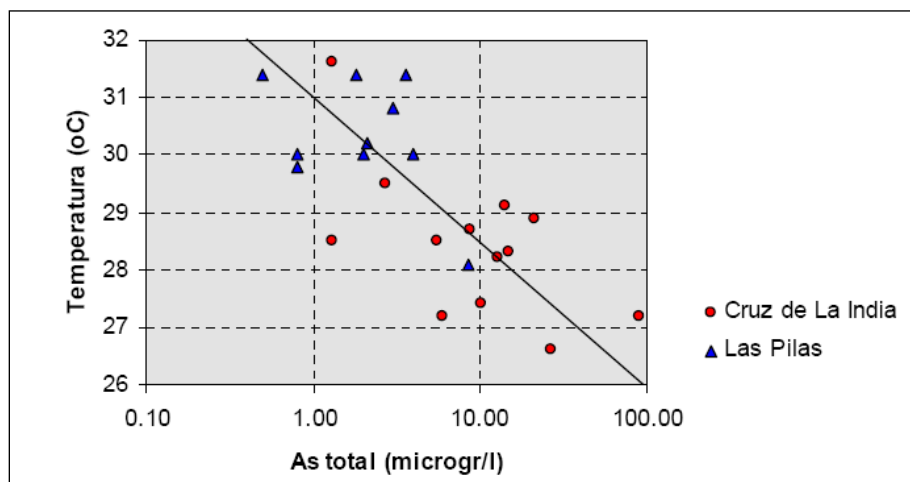


Figura 6. Correlación arsénico vs. t° . (Tomado de UNICEF, 2004).

Existe también, una buena correlación entre la profundidad total del punto de agua y la temperatura de la misma. El coeficiente de correlación es $R = 0,71$ para Las Pilas y $R = 0,78$ para Cruz de la India. Las concentraciones más altas de arsénico (círculos más grandes) se encuentran a pequeñas profundidades. Lo que corrobora lo expresado en el párrafo anterior, (Barragne-Bigot, 2004).

¹ Cruz de la India o Mina la India es la comunidad donde se ubica el pozo que fue seleccionado por el estudio.

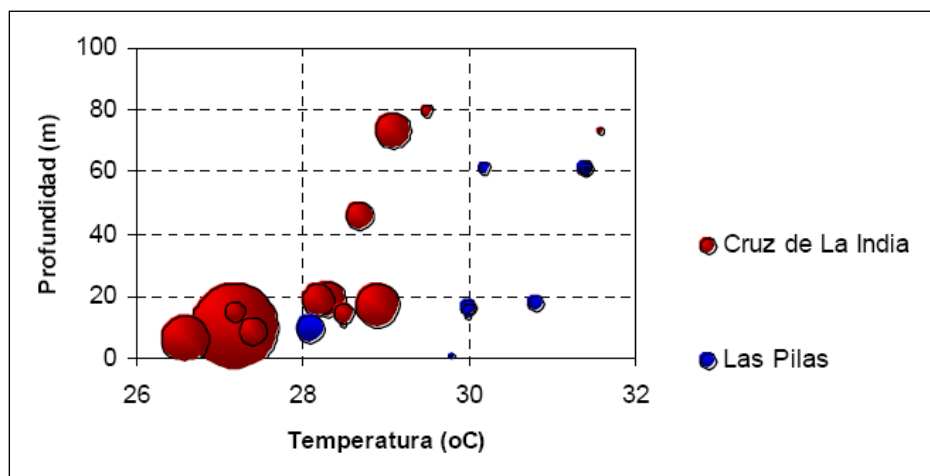


Figura 7. Correlación Profundidad vs. T°. (Tomado de UNICEF, 2004).

UNI-PIDMA, 2002, había mostrado que el arsénico está presente en ambientes oxidantes ($E_h > 400$ mV) con pH entre 6 y 8. Por lo tanto las especiaciones pentavalentes predominan. El predominio de arsénico (V) es confirmado con el estudio del UNICEF, 2003. En la zona de Cruz de la India-Las Pilas predomina la especie pentavalente $(\text{HAsO}_4)^{-2}$, (Barragne-Bigot, 2004).

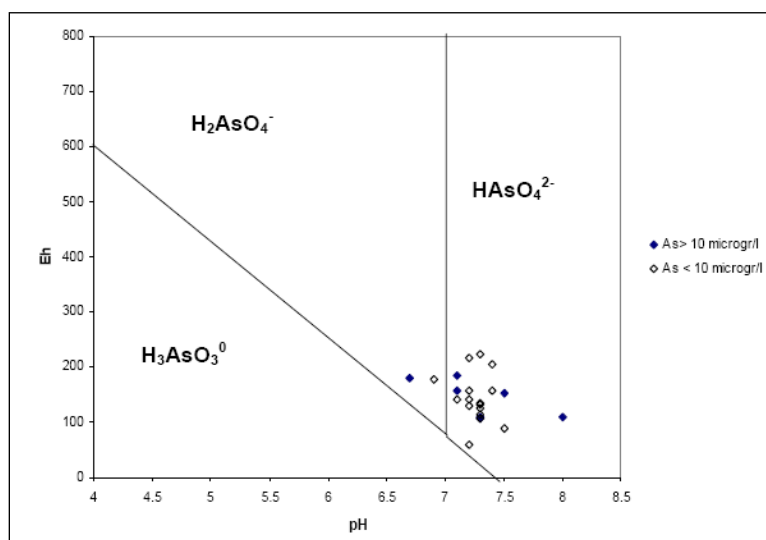


Figura 8. Especies de arsénico presente en la zona de Mina la India. (Tomado de UNICEF, 2004).

En tanto para la conductividad, no hay diferencia notable en cuanto el rango de conductividad eléctrica entre el ámbito nacional y las zonas contaminadas. Las

conductividades eléctricas están en su mayoría por debajo de los 1200 micromhos/cm. Eso significa que de manera general, las aguas subterráneas contaminadas naturalmente por arsénico no son más mineralizadas que las aguas sin contaminación. Los coeficientes de correlación entre arsénico y conductividad eléctrica muestra que las correlaciones más altas, entre 0,50 y 0,67, se encuentran en las zonas con índice de peligrosidad alto a muy alto (Cruz de la India, Kinuma, El Charco-Santa Rosa del Peñón), (Barragne-Bigot, 2004).

Los coeficientes de correlación estadística entre los diferentes parámetros fisicoquímicos se presentan a continuación, (Barragne-Bigot, 2004).

Tabla 12. Coeficiente de correlación parámetros fisicoquímicos en Mina la India. (Tomado de Barragne-Bigot, 2004).

N=13	As Total	Conductividad	Temperatura	pH	Eh	Profundidad	Altitud del nivel del agua
As Total	1,00						
Conductividad	0,50	1,00					
Temperatura	-0,44	-0,45	1,00				
pH	-0,50	-0,12	0,03	1,00			
Eh	0,41	0,20	0,19	- 0,61	1,00		
Profundidad	-0,33	-0,49	0,78	- 0,12	0,27	1,00	
Altitud del nivel del agua	-0,02	-0,19	0,13	- 0,03	- 0,15	0,07	1,00

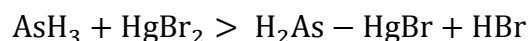
Fuente: Barragne-Bigot, 2004.

2.9. Tecnología utilizada para la detección de arsénico.

Hasta hace poco tiempo la determinación de arsénico en el agua estaba basada en los estándares determinados por equipo analítico a nivel de laboratorio, en este caso el horno de grafito de Espectrometría de Absorción Atómica (AAS), lo cual dificultaba el análisis de arsénico en aquellas regiones que distaban mucho de Laboratorio o en el caso muy frecuente no se dispone del AAS. El desarrollo del equipo portátil conocido como ARSEATOR diseñado por el Prof. Walter Kosmus del Departamento de Análisis Químico de la Universidad de Graz en Austria y probado por el Imperial College de Londres en Inglaterra, vino a facilitar el análisis de arsénico *in-situ*, permitiendo identificar

las fuentes de agua contaminadas y las poblaciones afectadas por arsénico en regiones aisladas. (www.wagtech.co.uk, 2008).

El ARSEATOR marca Wagtech está formado por dos partes principales: el cuerpo principal con el mecanismo electrónico para la lectura y la otra parte que la compone un Erlenmeyer, donde se produce la reacción y se retiene el gas producido por medio de papel filtro. La medición se basa en la generación de arsénico AsH_3 y la subsecuente detección vía reacción con bromuro de mercurio, esto es conocido hace décadas como el Método Gutzeit. El arsénico reacciona con el bromuro de mercurio de acuerdo a la reacción siguiente, (www.wagtech.co.uk, 2008).



La estructura de la reacción producida no es exactamente conocida. En el producto se observa un color amarillo que va tomando un color marrón a medida que avanza la reacción. En el método colorimétrico de Gutzeit, también conocido como el método de mancha de mercurio-bromuro, la corriente de gas conteniendo el arsénico se impregna en un papel filtro colocado en un pequeño tubo de vidrio sobre el recipiente de reacción. Al final de la reacción la longitud de la zona coloreada debe ser proporcional a la cantidad de arsénico reducido dentro del frasco de reacción. La estimación de la longitud de onda en la zona coloreada en el filtro se basa en la medida de la absorción de luz, realizada por un diodo que emite luz en el rango de longitud de onda adecuada y un fotodiodo registra la transmisión, (www.wagtech.co.uk, 2008).

La confiabilidad de las mediciones del ARSEATOR, fueron realizadas por el Dr. Peter Swash de la Royal School of Mines, Imperial College, Londres, Reino Unido, auspiciado por el Ministerio de Salud Pública, la UNICEF y el equipo de Agua y Sanidad de Yangon, con el fin de validarlo como un instrumento que puede ser usado para pruebas de determinación de concentración de arsénico en el campo en Proyectos de Mitigación de Arsénico, (www.wagtech.co.uk, 2008).

La evaluación realizada por el Dr. Swash concluye que el ARSENATOR aporta resultados cuantitativos precisos de la concentración de arsénico total de muestras tomadas *in-situ*. Previo al inicio de cada actividad en el campo, es necesario evaluar el funcionamiento del equipo tomando como referencia ejemplos de concentraciones de arsénico que han sido determinadas por el AAS. Para que el ARSENATOR sea aceptado como un instrumento confiable, debe obtenerse una correlación 1:1 entre dos series de datos. Las recomendaciones del Dr. Swash para el uso son las siguientes, (www.wagtech.co.uk, 2008).

- a. Existe oportunidades potenciales para que surjan errores de operación, lo cual es la razón de pobre precisión y resultados erróneos. Hay errores comunes, los cuales pueden ser fácilmente rectificables una vez identificados por el operador.

Errores de operación más comunes:

- Colocación retardada de los tres filtros en la trampa triple, una vez retirado del frasco de almacenamiento de filtros.
 - Incorrecta estandarización del equipo.
 - Incorrecta colocación de los filtros en los slide que contienen los filtros en la trampa.
 - Tiempo insuficiente de reacción.
- b. Previo a la realización de mediciones de concentración de arsénico en el campo es necesario evaluar el equipo con estándares conocidos, condiciones de las baterías y la experiencia del operador.
 - c. Es recomendable que el 2 % de los resultados de campo sean verificados en el Laboratorio con el AAS, especialmente en regiones con concentraciones de arsénico total entre 40 µg/L – 60 µg/L.
 - d. Un análisis estadístico debe ser realizado para dar seguimiento a los resultados de campo.
 - e. La supervisión del uso del equipo debe ser permanente, especialmente durante la calibración del equipo.

El sistema digital Arsenator es ahora reconocido como la opción más confiable y precisa para pruebas de campo, siendo usado en regiones alejadas por organizaciones como la UNICEF y la OMS. Se obtienen resultados en 20 minutos, dentro de un rango entre 2 $\mu\text{g/L}$ a 100 $\mu\text{g/L}$. No puede ser usado para realizar mediciones de concentración de arsénico por encima de 100 $\mu\text{g/L}$. Además es ambientalmente amigable, (www.wagtech.co.uk, 2008).



Figura 9. El Wagtech Arsenator. Tomado de <http://www.wagtech.co.uk/products/water-and-environmental/water-test-kits/arsenator>, 2008.

III.DISEÑO METODOLÓGICO DEL ESTUDIO.

El propósito de este estudio fue evaluar el comportamiento de los filtros KANCHAN Y SONO filter removiendo arsénico en aguas subterráneas con concentraciones que sobrepasan los 10 µg/L admitidos para agua potable por la norma de calidad de agua del país. Estas tecnologías son de uso domiciliario diseñadas para la remoción de arsénico en agua para consumo humano, a base de hierro y arena. Han sido probadas exitosamente y ampliamente en los países de Nepal y Bangladesh, respectivamente.

Paralelo a este estudio dos colegas evaluaron el comportamiento de las mismas tecnologías en aguas con concentración de arsénico entre los rangos de 40 µg/L - 60 µg/L y 60 µg/L – 80 µg/L de arsénico en la Comunidad de Santa Rosa del Peñón.

3.1. Área de Estudio.

Los filtros se construyeron, instalaron y operaron en los laboratorios del CIEMA-UNI. La fuente de agua seleccionada fue un pozo excavado con brocal y bomba de mecate de uso domiciliario, propiedad del señor Andrés Vílchez Matamoros, (figura 11). Se localiza en el poblado de la Comunidad de Mina la India en el Municipio de Santa Rosa del Peñón, Departamento de León, Nicaragua, en las coordenadas 1409292 Latitud Norte y 575540 Longitud Este, (figura 12).

Durante visita de reconocimiento en el Pozo seleccionado se detectó una concentración de 93 µg/L de arsénico de acuerdo a medición realizada con el equipo portátil ARSEATOR. Este pozo se encuentra ubicado a 3 metros de distancia aproximadamente del pozo público al que se le detectó con una concentración de 90,20 µg/L, (UNICEF, 2003).



Figura 10. Fuente de agua seleccionada contaminada con arsénico. Comunidad Mina La India. (Foto: Ariel Aragón, 2008).

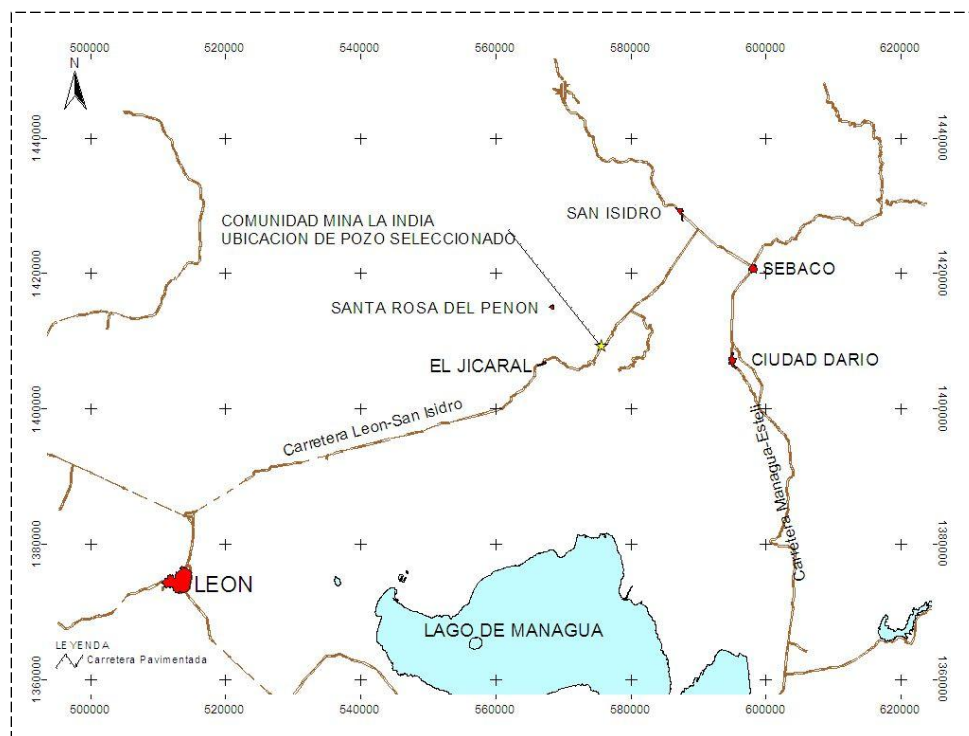


Figura 11. Ubicación de fuente de agua seleccionada. (Fuente: Elaboración propia, 2008).

3.2. Programa de Trabajo.

El estudio se desarrolló en cuatro etapas:

Etapas 1: Identificación de la fuente y construcción de filtros.

En el mes de octubre de 2008 se realizaron las actividades siguientes:

1. Documentación bibliográfica.
2. Consulta a expertos del CIEMA.
3. Diseño y construcción de los filtros.
4. Identificación de la fuente de agua dentro del rango de concentración de 80 µg/L – 100 µg/L de arsénico.

Etapas 2: Evaluación del comportamiento de los filtros.

En el período comprendido octubre de 2008 a enero de 2009 se evaluaron los filtros. El agua contaminada a filtrar se recolectó del pozo seleccionado una vez por semana. Esta era transportado al CIEMA-UNI. Se determinaron los valores de los parámetros siguientes:

1. Concentración de arsénico en el agua filtrada.
2. Tasa de filtración.
3. Temperatura.
4. Conductividad eléctrica.
5. pH.
6. Potencial redox.
7. Turbiedad.
8. Hierro.
9. Fosfato.

Etapas 3: Procesamiento y presentación preliminar de datos.

En el período comprendido entre Abril y Junio de 2009 se procesó de manera preliminar los datos. En el mes de julio se presentaron resultados parciales ante representantes de la UNI,

Instituciones de Gobierno y Organismos no Gubernamentales vinculadas al sector de agua potable y saneamiento del país.

Etapas 4: Redacción de conclusiones del estudio.

Duró el período comprendido entre Julio y Diciembre de 2009. Los resultados finales, conclusiones y recomendaciones del estudio son parte de la presente Tesis para optar al grado de Maestro en Ingeniería Ambiental (Ciclo 2004-2005) del CIEMA-UNI.

3.3. Modelos Experimentales.

Se construyó un filtro KANCHAN y un filtro SONO ajustándose, en lo posible, a las características y arreglo de material del diseño original descrito en la bibliografía encontrada en Internet. Los filtros son de flujo discontinuo, el agua es vertida en el filtro y el agua filtrada sale a caudales bajos dependiendo del nivel de agua encima de la capa de arena.

3.3.1. Filtro KANCHAN.

En el arreglo del filtro KANCHAN está formado por un balde de plástico de 45 L con tubería de salida. Se compone de dos secciones, la primera de remoción de arsénico compuesta de una pana con orificios de salida en la parte inferior que contiene una aglomeración de clavos oxidados previamente donde se realiza la adsorción del arsénico por acción del hidróxido de hierro, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La segunda sección de retención del complejo hierro-arsénico y patógenos compuesta de un filtro lento de arena con diámetro menor de 1 mm, arena media con diámetro entre 3 mm – 6 mm y grava con diámetro entre 6 mm – 15 mm.

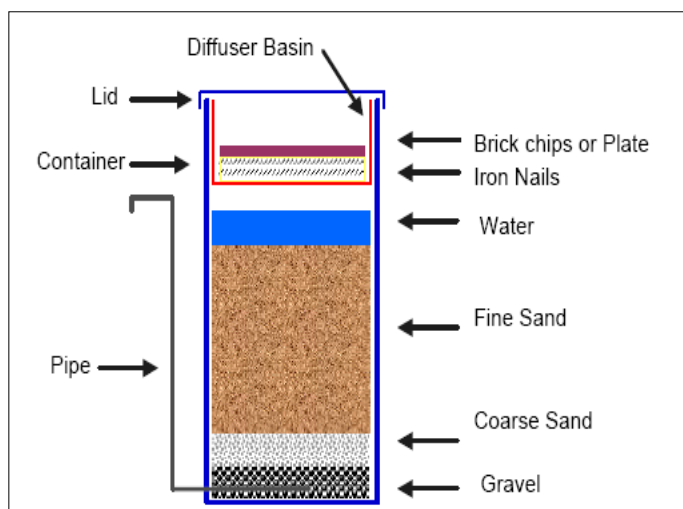


Figura 12. Componentes del KAFTM. (Tomado de Ngai y colaboradores, 2006).

3.3.2. SONO filter.

Los materiales usado en las especificaciones generales del SONO filter contiene un recipiente superior de 45 L, que en su arreglo está compuesto de arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm y una matriz compuesta de hierro, las partículas gruesas del filtro de arena imparten estabilidad mecánica, mientras que la matriz compuesta de hierro quita el arsénico inorgánico. Un recipiente inferior de 25 L conteniendo arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm, arena con diámetro menor de 1 mm, carbón de leña y ladrillos de barro. El agua fluye en este segundo recipiente donde se filtra otra vez, a través de arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm, después entra en contacto con el carbón de leña de madera para quitar la materia orgánica y finalmente a través de la arena con diámetro menor de 1 mm de río y trozos de ladrillos para quitar partículas fina y estabilizar el flujo del agua.

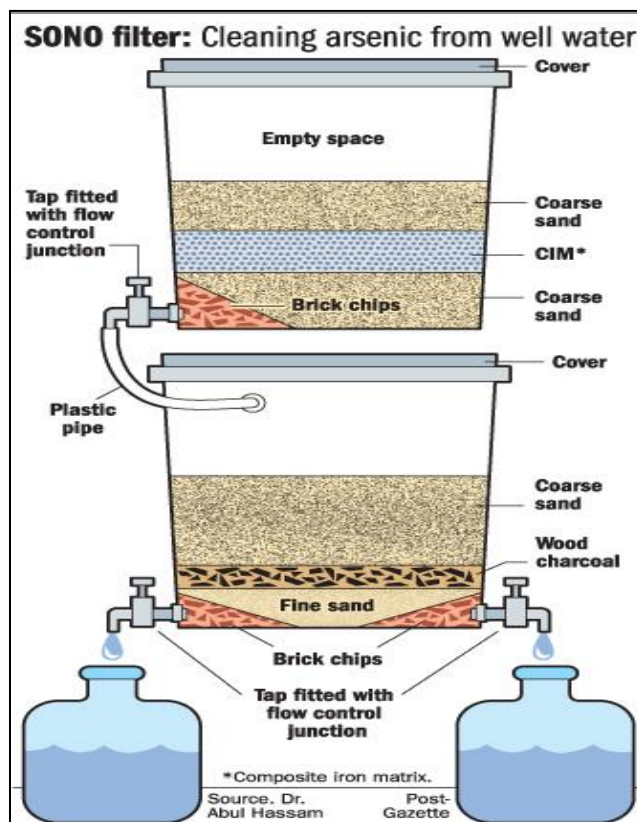


Figura 13. Diagrama de SONO-FILTER, Modelo SF-TWIN, Patent 1003935, 2002. (Tomado de Hussam y Munir, 2007).

3.4. Método Experimental.

Haciendo uso de materiales locales para la configuración, los filtros fueron construidos siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación.

3.4.1. Configuración de los filtros.

Los materiales del medio filtrante que se utilizaron para construir cada filtro se obtuvieron localmente en la ciudad de Managua y sus alrededores. Las características de los materiales se detallan abajo.

3.4.1.1. Unidad Principal.

a. Filtro KANCHAN.

Está formado por un solo un balde de 45 Litros con su tapadera.

Tabla 13. Dimensiones del balde del filtro KANCHAN.

Dimensión	Unidad
Diámetro1 interno (m)	0,32
Diámetro2 interno (m)	0,38
Altura del balde (m)	0,46
Volumen (L)	45

b. SONO filter modificado.

El SONO filter lo forman dos unidades principales que son un balde de 30 Litros y otro más pequeño de 25 Litros, ambos con tapadera.

Tabla 14. Dimensiones de los baldes del SONO filter modificado.

Dimensión	Unidad	
	Balde superior	Balde inferior
Diámetro1(m)	0,35	0,33
Diámetro2 (m)	0,31	0,29
Altura (m)	0,35	0,33
Volumen (L)	30	25

3.4.1.2. Sección de adsorción de arsénico.

a. Filtro Kanchan.

Los clavos oxidados proporcionan el hidróxido de hierro para adsorber el arsénico del agua y formar el complejo hierro-arsénico que precipita al medio filtrante. Los clavos se colocan

en una pana de plástico de 10 Litros con 2 orificios de salida de 2 mm suspendida en la parte superior de la unidad principal.

Tabla 15. Dimensiones de la Pana del filtro KANCHAN.

Dimensión	Unidad
Diámetro1 interno (m)	0,30
Diámetro2 interno (m)	0,38
Altura (m)	0,11
Volumen (L)	10

b. SONO filter modificado.

Debido a la imposibilidad de contar con la MATRIZ DE COMPUESTO DE HIERRO (CIM) del SONO filter original se optó por usar 5 kilogramos clavos de hierro en lugar del CIM. Estos se colocaron en el balde superior entre dos capas de arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm.

c. Clavos de hierro.

En ambos filtros se colocaron 5 kg de clavos de 1 pulgada (< 20 mm), no galvanizados previamente oxidados. Los clavos oxidados sustituyeron la matriz de compuesto férrico presente en el diseño original del SONO filter.

d. Ladrillos de barro.

Los ladrillos de barro son lavados antes de usar, quebrados en trozos, estos fueron colocados sobre los clavos oxidados para atenuar la energía generada por el agua vertida en la pana del filtro KANCHAN. Tanto en el balde superior como inferior del SONO filter modificado se utilizaron pequeños trozos de ladrillos justamente en salida del agua usados para estabilizar el flujo en el medio.

3.4.1.3. Tiempo de Retención o Contacto.

a. Filtro KANCHAN.

Para el filtro KANCHAN el tiempo de retención del agua en la pana de soporte de los clavos oxidados fue de 20 minutos. Los cálculos de la “hidráulica de la pana” determinaron la cantidad y diámetro de los orificios de salida en función del tiempo de retención y contacto requerido, lo cual dio como resultado 2 orificios de 2 mm cada uno, ver cálculo abajo.

Las formulas utilizadas para determinar el número de orificios de la pana en función del tiempo de retención fueron las siguientes:

$$h = kv^2/2g$$

donde: $k = 1$ (coeficiente de contracción de boquilla adimensional), h = pérdida de carga (m); v = Velocidad del flujo (m/s) y g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

$$V = Q/A$$

donde: V = Velocidad del flujo (m/s); Q = Caudal de agua (m^3/s) y A = Área (m^2).

$$Q = Vol / T$$

donde: Q = Caudal de Agua (m^3/s); Vol = Volumen de agua en la pana (m^3) y T = Tiempo de retención (min).

De estas relaciones nos da una ecuación en función del tiempo de retención, la carga de agua, el volumen y el diámetro. Por prueba y error se determina el número de orificios de la pana.

El diámetro es,

$$d = (((Vol / T) \times 4) / ((2 \times g \times h / k)^{1/2} \times 3,1416))^{1/2} \quad (m)$$

La pana de los filtros tiene una capacidad de 10 lts (0,01006488 m³), el tiempo de retención es de T = 20min y la altura de la pana es de 0,11m con estos valores se determinó el diámetro de los orificios:

$$d = (((0,01006488 / (20 \cdot 60)) \cdot 4) / ((2 \cdot 9,81 \cdot 0,11/1)^{1/2} \cdot 3,1416))^{1/2} = 2,6962E-03$$

$$d = 2,6962E-03m$$

$$d = 2,70 \text{ mm}$$

Al perforar la pana con un rayo de bicicleta con un diámetro $d_r = 2 \text{ mm}$, la cantidad de orificios es igual a:

No. orificios = $d / d_r = 2,70 / 2 = 1,35$ hoyos que es aproximadamente 2 hoyos. Por tanto la cantidad de orificios en la pana es de dos perforaciones de 2 mm cada una de ellas.

b. SONO filter modificado.

Para el caso del filtro SONO se diseñó un tiempo de retención del agua de 20 minutos, de tal manera que el tiempo de contacto del agua con los clavos oxidados en el interior del balde fuera similar. A fin de hacer más sencillo la operación del filtro, de esta manera evitar estar tomando el tiempo de cierre del regulador de flujo en el balde superior (1 Llave de chorro PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " para controlar los 20 minutos de retención, se colocó en el balde superior una pana de plástico de 10 litros con 2 orificios de 2 mm abiertos en los extremos de la parte inferior que regula el flujo del agua. Los cálculos se detallan abajo.

Tabla 16. Dimensiones de la Pana del SONO filter modificado.

Dimensión	Unidad
Diámetro1 interno (m)	0,25
Diámetro2 interno (m)	0,35
Altura (m)	0,14
Volumen (L)	10

Utilizando las formulas del inciso a,

La pana de los filtros tiene una capacidad de 10 L (0,01006488 m³), el tiempo de retención es de 20min y la altura de la pana es de 0,14m, con estos valores se determinó el diámetro de los orificios:

$$d = (((0,01006488 / (20*60)) \times 4) / ((2*9,81*0,14/1)^{1/2} \times 3,1416))^{1/2} = 2,7103E-03$$

$$d = 2,7103E-03m$$

$$d = 2,71 \text{ mm}$$

Al perforar la pana con un rayo de bicicleta con un diámetro $d_r = 2 \text{ mm}$, la cantidad de orificios es igual a:

No. orificios = $d / d_r = 2,71 / 2 = 1,36$ hoyos que es aproximadamente 2 hoyos. Por tanto la cantidad de orificios en la pana es de dos perforaciones de 2 mm cada una de ellas.

3.4.1.4. Sección de Filtración Lenta.

a. Grava.

El tamaño de la grava utilizada en el filtro KANCHAN es de 6 mm – 15 mm de tamaño. Se lavó con agua antes de usar para retirar partículas de polvo y otras innecesarias. El SONO filter no utiliza grava.

b. Arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm.

En ambos filtros el tamaño de la arena media utilizada es de 3 mm – 6 mm, también, es lavada con agua para retirar partículas de polvo y otras innecesarias.

c. Arena de río con diámetro menor de 1 mm.

La arena fue extraída de un banco de arena ubicado en un cauce en el sector del volcán Momotombo. En el mismo lugar de extracción fue tamizada para seleccionar la arena con tamaño menor de 1 mm. Se lavó rigurosamente con agua antes de usar para retirar partículas de polvo.

Para estar seguro de la idoneidad de la arena recolectada, se realizó un análisis de las propiedades físicas, los valores de las propiedades físicas de la arena, a saber, tamaño y distribución del grano, porosidad y permeabilidad no permiten que las partículas de hierro y arsénico penetren en la capa de arena fina, (Ghimire, 2005).

El procedimiento para el análisis de la arena con diámetro menor de 1 mm es el siguiente:

- Porosidad.

La porosidad de la arena fue determinada por el método del beacker. Este método se basa en replicar las condiciones del terreno en el laboratorio. La arena seca se puso dentro del beacker. Se agregó agua dentro del beacker hasta saturar la arena. Este volumen de agua agregada se define como V_v (mL), el volumen de arena saturada se define como V (mL). Entonces la porosidad se determinó por la siguiente ecuación:

$$n = V_v * 100 / V$$

Se añadió a un beacker de 2000mL de capacidad, la cantidad de 1000mL de arena seca, posteriormente con una probeta de 150mL de capacidad se vertieron dentro del beacker 404mL de agua, hasta saturar la arena. Entonces la porosidad se determinó usando la expresión antes señalada dando una porosidad de:

$$n = (404\text{ml} / 1000\text{ ml}) * 100 = 40,4 \%$$

$$n = 40,4 \%$$

La Porosidad de la arena se relaciona con su forma: las arenas redondeadas tienen porosidades que varían entre 40 % y 44 % y las arenas angulares, porosidades mayores, por lo general entre 42 % y 46 %. Comúnmente a menor porosidad mejor efluente se obtiene.

- Análisis Granulométrico de la arena.

El material granular para el filtro se seleccionó por medio del cernido en tamices, siguiendo la serie estándar americana. Para analizar la muestra se pesó una cantidad 500g, se cierne en tamices consecutivos y se va obteniendo el tanto por ciento del peso retenido en cada

tamiz con relación al total. El resultado se dibuja con el objeto de facilitar las interpolaciones, la forma y pendiente de la curva muestra la graduación de la arena, (figura 15).

Tabla 17. Ensayo granulométrico de la arena de Cauce Momotombo.

No. tamiz	Peso retenido parcial (g)	% retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa
16	0,5	0	0	100
30	129,5	26	26	74
50	300	60	86	14
100	54,5	11	97	3
200	15,5	3	100	0
Pasa No 200	0,0	----	----	----
Total	500.0	100	----	----

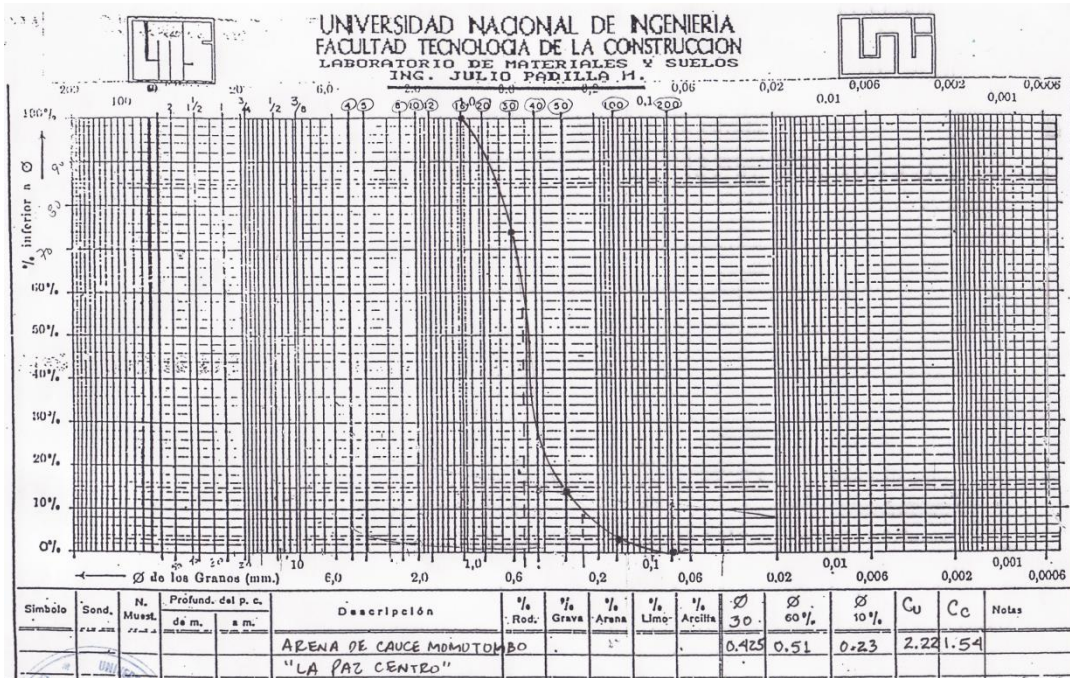


Figura 14. Curva granulométrica de la arena menor de 1 mm.

Coeficiente de uniformidad.

Allen Hazen sugirió como parámetros básicos para caracterizar los medios granulares, lo que él denominó “Coeficiente de Uniformidad y Diámetro Efectivo”.

El Coeficiente de la uniformidad **Cu**, es la razón del 60 % al 10 % así.

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

Donde:

D_{60} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 60 % (mm).

D_{10} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 10 % (mm).

El diámetro efectivo **D₁₀** es la abertura del cedazo ideal que deja pasar el 10 %.

Del análisis granulométrico de la arena el **D₆₀** = 0,51 y el **D₁₀** = 0,23, determinándose un valor de Coeficiente de Uniformidad de:

$$C_u = 0,51/0,23 = 2,22$$

$$C_u = 2,22$$

Coeficiente de curvatura.

El Coeficiente de curvatura **Cc**. Se define como:

$$C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$$

donde:

D_{60} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 60 % (mm).

D_{30} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 30 % (mm).

D_{10} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 10 % (mm).

Del análisis granulométrico de la arena el $D_{60} = 0,51$, $D_{30} = 0,425$ y el $D_{10} = 0,23$, determinándose un valor de Coeficiente de Curvatura de:

$$C_c = ((0,425)^2 / (0,23 * 0,51)) = 1,54$$

$$C_c = 1,54$$

Permeabilidad

La permeabilidad también fue determinada por la fórmula empírica propuesta por Allen Hazen. Para arenas limpias (con menos del 5 % de fino) y el tamaño de D_{10} entre 0,1 mm y 3,0 mm:

$$k = C D_{10}^2$$

donde:

K = Permeabilidad (centímetros/s).

C = constante que varía entre 0,4 a 1,2 con un valor medio de 0,8

D_{10} = el diámetro efectivo (mm).

Del análisis granulométrico de la arena el $D_{10} = 0,23$, determinándose un valor de Permeabilidad de:

$$k = 0,8 * (0,23)^2$$

$$k = 4,23E-02 \text{ cm/s}$$

El análisis granulométrico de la arena fue realizado por el laboratorio de materiales y suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería, ver anexo 3.

d. Carbón orgánico.

En el balde inferior del SONO filter modificado se colocan 2 kg de carbón de leña. Se seleccionó trozos de carbón lo más uniforme posible para formar una capa de carbón bien distribuida.

3.4.2. Construcción de los filtros.

Como se indica anteriormente para esta investigación se construyeron dos filtro, un filtro KANCHAN y un SONO filter modificado. En este acápite se detallan el procedimiento y los accesorios de PVC utilizados para la construcción de los filtros.

3.4.2.1. Accesorios de PVC.

Los accesorios utilizados para la construcción del filtro KANCHAN son:

- ✓ 3 Niples de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ", con dimensiones de 0,10 y 0,28.
- ✓ 1 Tapón liso PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- ✓ 1 Adaptador macho PVC con rosca $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- ✓ 2 Codos lisos PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "x 90° sin rosca.
- ✓ 1 Codo PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "x 90° extremo liso y roscado.
- ✓ 2 Empaques de hule de $\Phi \frac{1}{2}$ ".

Los accesorios utilizados para la construcción del SONO filter modificado son:

- Balde Superior:
 - ✓ 1 Llave de chorro PVC de Φ ½".
 - ✓ 2 Empaques de hule de Φ ½".
 - ✓ 0,5m de Manguera plástica flexible de Φ ½".
 - ✓ 1 Terminales para mangueras.
- Balde Inferior:
 - ✓ 3 Adaptador macho PVC con rosca de Φ ½".
 - ✓ 2 Llave de chorro PVC de Φ ½".
 - ✓ 1 Rosca PVC de Φ ½".
 - ✓ 4 Empaque de hule de Φ ½".

3.4.2.2. Oxidación de los clavos.

Los clavos fueron oxidados previos a la construcción de los filtros. Es importante que los clavos estén bien oxidados al momento de introducirlo en el filtro, ya que hay una alta probabilidad de que se obtenga una buena eficiencia de remoción de arsénico, a partir de la primera semana de operación del filtro, usando clavos oxidados previamente, (Samnang y colaboradores, 2008). Para acelerar la oxidación se colocaron sobre una lámina de zinc, se rociaron periódicamente con agua y se expusieron a la humedad del ambiente. Una vez que se oxidaron los clavos se procedió a la construcción de los filtros.

3.4.2.3. Procedimiento de construcción.

La construcción del filtro KANCHAN tuvo un costo de C\$424 córdobas y el SONO filter modificado C\$654 córdobas. Los materiales y accesorios de PVC se detallan en la tabla 32 en anexo 1. Antes de iniciar la construcción de los filtros se preparó una fuente de calor que serviría para calentar un niple de tubería de Ho.Go de ½" para realizar la perforación en los baldes y un rayo para perforar orificios en niples y panas.

a. Filtro KANCHAN.

Construcción.

- Se cortaron niples de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " en longitudes de 0,10m, 0,25m y 0,28m.
- Con el rayo de bicicleta caliente se realizaron dos perforaciones pequeñas de 2 mm de diámetro en la parte inferior del niple que va dentro del balde.
- Se colocó el tapón al niple de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " que va dentro del balde uniéndolo con el adaptador macho de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- Se trazó una línea a dos pulgadas del fondo del balde y realizó un agujero de $\Phi \frac{1}{2}$ " por debajo de la línea usando el niple de hierro caliente.
- Se puso el adaptador macho de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " con su empaque de hule en el agujero del balde. En el niple los dos agujeros deben estar en el fondo (hacia abajo).
- En la parte exterior se unieron los niples y codos al adaptador hembra, conjuntamente con su empaque de hule.
- Las tuberías se sellaron con teflón o pegamento para evitar el goteo.
- En el fondo de la pana de soporte de los clavos se realizaron dos perforaciones de 2 mm de diámetro de forma equidistante.
- Se llenó el balde con agua, verificando que no haya filtración en la parte exterior en la unión de la tubería.
- Se determinó el tiempo necesario para llenar un litro de agua en un recipiente, el tiempo estimado del llenado debe ser entre 2 y 3 minutos.
- Al no existir filtración y el llenado del litro de agua tomó un tiempo de entre dos y tres minutos, la construcción se ha completado satisfactoriamente.

Instalación del filtro.

- Se construyó una superficie estable y bien nivelada donde se colocó el filtro.
- Se agregaron 20 gotas de hipoclorito de sodio a 10 litros de agua.
- Se puso el agua clorada dentro del balde.

- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde 6 litros de grava lavada con diámetro de 6 mm – 15 mm. Suavemente se agregó la grava dentro del filtro, la grava cubrió el tubo de drenaje.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una segunda capa de 4 litros de arena lavada con diámetro 3 mm – 6 mm. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro, procurando no mezclar la arena con diámetro 3 mm – 6 mm con la grava de 6 mm – 15 mm.
- Usando un recipiente de 1 litro, se adicionaron 5 litros de agua (no-clorada) al recipiente.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa de 16 litros de arena lavada con diámetro menor de 1 mm. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro, procurando no mezclar la arena con diámetro menor de 1 mm con la arena con diámetro entre 3 mm – 6 mm.
- Se colocaron los 5 kg de clavos de hierro oxidados dentro de la pana de soporte y se extendieron uniformemente. Se agregaron astillas de ladrillo o piedras para cubrir los clavos y distribuir uniformemente el agua.
- Se tapó el balde con la tapa
- Esperar por un tiempo de 48 horas para desinfectar la arena.
- Se vertieron 45 litros de agua en el filtro y se desechó el agua filtrada.
- Terminada esta operación el filtro se pudo operar.

Tabla 18. Arreglo del filtro KANCHAN.

Material/Especificación	Cantidad/ Criterio/ Capacidad	Unidad de medida
Clavos de hierro de 1 pulgada.	5	kg
Arena fina de río (<1 mm).	16	lt
Arena media (3 mm a 6 mm).	4	lt
Grava (6 mm a 15 mm).	6	lt

Material/Especificación	Cantidad/ Criterio/ Capacidad	Unidad de medida
Balde de plástico.	45	Lts
Pana de plástico.	10	lt
Trozos de ladrillos de barro (5cm a 10cm).	2,5	kg
Nivel de agua por encima de la arena<1 mm.	5	cm
Volumen de agua por encima de la arena<1 mm.	5	lt
Volumen de espacio vacío entre el Nivel estático del agua y la pana.	3	lt

b. SONO filter modificado.

Construcción.

- Se trazó una línea a dos pulgadas del fondo del balde superior de 30 litros y realizó un agujero de $\Phi \frac{1}{2}$ " por debajo de la línea, usando el niple de hierro caliente donde se colocó una llave de chorro de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- En la parte superior del balde inferior de 25 litros se hizo una perforación de $\Phi \frac{1}{2}$ ", usando el niple de hierro caliente, uniendo posteriormente el balde superior e inferior por medio de una manguera transparente flexible de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- En el balde inferior con capacidad de 25 litros se realizaron dos perforaciones de $\Phi \frac{1}{2}$ " en extremos opuestos usando el niple de hierro caliente, posteriormente se colocaron dos llaves de chorro de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- Usando el rayo de bicicleta caliente en el fondo de la pana se realizaron dos perforaciones de 2 mm de diámetro de forma equidistante.

- Se llenó el recipiente con agua verificando que no existiera filtración en la parte exterior de ambos baldes en la unión de las llaves.
- Al no existir filtración la construcción se ha completado satisfactoriamente.

Instalación del filtro.

- Se construyó una superficie estable bien nivelada donde se colocó el filtro.
- Se agregaron 20 gotas de hipoclorito de sodio a 10 litros de agua.
- Se puso el agua clorada en el balde inferior de 25 litros.
- Se puso trozos de ladrillos de tejas en el fondo del balde superior junto a la llave de chorro.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde superior 5 kg de arena lavada con diámetro entre 3 mm – 6 mm. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro.
- Se colocó como segunda capa los 5 kg de clavos de hierro oxidados dentro del balde superior y se extendieron uniformemente, sustituyendo de esta manera la matriz de compuesto de hierro.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa de 5 kg de arena lavada, con diámetro entre 3 mm – 6 mm, en el balde superior. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro.
- Se puso en el fondo del balde inferior, trozos de ladrillos de tejas en los extremos donde se colocaron las llaves de chorro de $\Phi \frac{1}{2}$ " PVC.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde inferior 5 kg de arena lavada con diámetro menor de 1 mm. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro.
- Se colocó como segunda capa de 2 kg de carbón de leña seleccionando trozos de carbón lo más uniforme posible.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa de 5 kg de arena lavada con diámetro entre 3 mm – 6 mm. Suavemente se agregó la arena dentro del filtro.

- Terminada esta operación el filtro se pudo operar.

Tabla 19. Arreglo del SONO filter (Modificado).

Material/Especificación	Cantidad/ Criterio/ Capacidad	Unidad de medida
<u>Balde superior</u>		
Clavos de hierro de 1 pulgada.	5	kg
Arena media (3 mm a 6 mm).	10	kg
Balde de plástico.	30	lt
Trozos de ladrillos de barro (5cm a 10cm).	1	kg
<u>Balde inferior</u>		
Arena fina de río (<1 mm).	5	kg
Arena media (3 mm a 6 mm).	5	kg
Balde de plástico.	25	lt
Trozos de ladrillos de barro (5cm a 10cm).	1	kg
Carbón orgánico.	2	kg

3.5. Operación de los filtros.

La operación duró aproximadamente 3 meses. Los filtros fueron instalados en el CIEMA-UNI, para facilitar la operación y análisis de las variables de estudio.

a. Filtro KANCHAN:

La operación del filtro es sencilla; consistió básicamente en verter 10 litros de agua sobre los clavos oxidados colocados en la pana del filtro y recargar con el mismo volumen cuando el nivel de agua está por debajo de la mitad. Los 10 litros de agua corresponden a la capacidad de la pana. Casi inmediatamente se obtiene agua tratada y la recolecta se

realizaba por medio de un recipiente que se ubicó en dirección de la salida del agua del tubo de drenaje.

b. SONO filter modificado:

Consistió en verter 10 litros de agua en el filtro. Los 10 litros de agua corresponden a la capacidad de la pana ubicada en la parte superior del filtro para regular el flujo de agua hacia el interior del filtro. Pasado 20 minutos de contacto entre el agua y los clavos oxidados, se abría la llave de chorro, para permitir la circulación del agua hacia el Balde inferior e inmediatamente se obtiene agua tratada a través de las llaves de chorro.

3.5.1. Ciclo de filtración.

En el SONO filter modificado se realizó un ciclo de filtración de 10 litros de agua por día, durante un período de tiempo de 8 semanas. En el filtro KANCHAN se realizaron tres ciclos de filtración de 10 L, 20 L y 30 L por día, durante un período de tiempo de 10, 4 y 4 semanas, respectivamente.

Con los ciclos de filtración se sometieron los filtros a diferentes volúmenes de filtración de agua con arsénico, a fin de determinar posible decrecimiento en la eficiencia de remoción arsénico, turbiedad, hierro y tasa de filtración, al aumentar el volumen de agua filtrada.

a. Filtro KANCHAN.

La filtración se dividió en tres ciclos de filtración. En el primer ciclo se filtraron 10 litros de agua por día para un total de 450 litros de agua filtrada, en el segundo ciclo se filtraron 20 litros de agua por día para un total de 380 litros de agua filtrada y el tercer ciclo se filtraron 30 litros de agua por día para un total de 570 litros de agua filtrada.

b. SONO filter modificado.

Durante el ciclo de filtración de 8 semanas, se filtraron 10 litros de agua por día para un total de 360 litros de agua filtrada.

3.5.2. Variables de estudio.

Las variables que se analizaron durante la operación de los filtros son las siguientes:

a. Arsénico.

La medición de la concentración inicial de arsénico se realizó en el sitio de recolección de agua. La concentración de arsénico en el agua filtrada era medida diariamente de muestra tomada por cada 10, 20, 30 litros de agua filtrada.

La revisión de estudios anteriores, permitió asumir inicialmente que el arsénico presente en el agua es el arsénico (V). En la zona de Cruz de la India-Las Pilas predomina la especie pentavalente $(\text{HAsO}_4)^{-2}$, (Barragne-Bigot, 2004). Para comprobar la especie de arsénico predominante se utilizaron los datos de pH y potencial redox medidos en el agua de pozo y el diagrama Eh-pH ajustado a 27 °C y 1 atm. con una concentración de 10^{-6} mol/L de arsénico.

En la medición del potencial redox se utilizó un electrodo de mercurio, por tanto, los valores obtenidos se transformaron de la escala de mercurio a la escala de plata sumándole 0,222v, para poder ser graficados en el diagrama Eh-pH.

b. Hierro.

El hierro natural presente en el agua subterránea se determinó para conocer el aporte natural de hierro en la remoción de arsénico. Las mediciones de hierro se realizaron en el agua de pozo. El hierro es un indicador de la eficiencia de remoción de arsénico de los filtros, por lo tanto, si el hierro es encontrado en el agua filtrada, entonces es muy probable que el arsénico sea encontrado también, (Ngai y Walewijk, 2003).

c. Fosfato.

La bibliografía consultada plantea que este parámetro es importante tenerlo en cuenta, debido a que compite por el hierro con el arsénico. El Fosfato puede reducir significativamente la adsorción del arsénico, porque usualmente está presente en altas

concentraciones como el arsénico, (Mahin y colaboradores, 2008). El análisis de fosfato se realizó en el agua de pozo.

d. Turbiedad.

La turbiedad es otro parámetro que se evaluó en el agua filtrada para monitorear posibles alteraciones con respecto a la concentración inicial presente en el agua de entrada. Algunos autores señalan que no siempre existe una correlación entre la remoción de turbiedad y la remoción de arsénico, sin embargo, para una remoción de arsénico es un prerequisite una buena remoción de turbiedad. Las mediciones de turbiedad se realizaron en el agua de pozo, agua de entrada y en el agua tratada.

Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces ocasiona el rechazo de los consumidores. Los estudios elaborados por Tracy y por Sanderson y Kelly han demostrado que en el proceso de eliminación de los organismos patógenos, por la acción de agentes químicos como el cloro, las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante. Por esta razón, si bien las normas de calidad establecen un criterio para turbiedad en la fuente de abastecimiento, esta debe mantenerse mínima para garantizar la eficacia del proceso de desinfección. Los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente una UNT y en ningún caso más de 5 UNT. Las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá y las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 UNT. La OMS indica, sin embargo, que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a una UNT.

e. Tasa de filtración.

La tasa de filtración, es uno de los factores más importante de aceptabilidad social de un filtro. Las comunidades prefieren filtros con alta tasa de filtración, (Shrestha, 2004). Una

tasa de filtración mayor a los 30 litros por hora, puede reducir la eficiencia del filtro, al no retener en el medio filtrante partículas de arsénico y hierro. Una tasa de filtración menor a los 5 litros por hora, puede ser muy inoportuna para el usuario. Para determinar la tasa de filtración, se siguieron los pasos siguientes:

- Se vertieron diariamente en cada uno de los filtros el volumen de agua correspondiente al ciclo de filtración (10 L, 20 L y 30 L).
- Con un balde graduado con capacidad de 10 litros se medían cada 10 litros de agua filtrada.
- El tiempo requerido para filtrar el volumen de agua correspondiente a cada ciclo de filtración se expresó en minutos. El equipo utilizado para medir el tiempo de filtración fue un cronometro.
- La tasa de filtración se expresó en litros por hora.

3.5.3. Parámetros de control de calidad de agua.

Los parámetros analizados para monitorear la calidad del agua filtrada fueron los siguientes:

a. Potencial de hidrogeno (pH).

El pH es uno de los parámetros más importante para la especiación del arsénico en el agua. Es la medida del grado de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa y se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+]$). Muchas de las reacciones químicas dependen del pH, el arsénico no es la excepción. En el rango de pH de 4 a 10, el compuesto arsenito (H_3As_3) predominante es neutro (no posee carga), contrario al arsenato (H_2As_4^-) que se encuentra cargado negativamente. La eficiencia de remoción del arsénico (III) es mucho menor a la del arsénico (V) debido a que este último tiene la carga negativa.

La revisión bibliográfica muestra que la mejor adsorción de arsénico (V) sobre $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tiene lugar entre un pH de 4 y 7. Al aumentar el pH, la adsorción de arsénico por el coágulo

de hidróxido de hierro disminuye. El pH del agua de pozo se utilizó para comprobar la especie de arsénico en el agua.

El pH del agua fue tomado en tres momentos: en la recolección de agua en el pozo, antes de iniciar la filtración de agua y en el agua filtrada de ambos filtros.

b. Conductividad Eléctrica.

La conductividad de una disolución es la medida de su capacidad para conducir la corriente eléctrica y se expresa habitualmente en microsiemens/centímetro (ms/cm). También, la conductividad eléctrica de agua fue tomada en tres momentos: en la recolección de agua en el pozo, antes de iniciar la filtración de agua y en el agua filtrada de ambos filtros. La conductividad eléctrica brinda información sobre la cantidad de las sustancias disueltas.

c. Potencial redox.

El potencial redox (Eh) y el pH son los parámetros más importantes que controlan la especiación del arsénico, o sea su estado de oxidación. Los potenciales redox controlan los procesos químicos naturales e indican los cambios en las propiedades del agua debido a los procesos biológicos aerobios o anaerobios. Los potenciales menores de -20 milivoltio (mV) se dan en procesos anaeróbicos, entre 0 mV y -200 mV son transicionales y los valores positivos indican procesos aeróbicos.

Se tomó en tres momentos: en la recolección de agua en el pozo, antes de iniciar la filtración de agua y en el agua filtrada de ambos filtros. El potencial redox del agua de pozo se utilizó para comprobar la especie de arsénico predominante en el agua.

d. Temperatura.

La temperatura es otro parámetro importante para la especiación del arsénico en el agua. Igual que las variables anteriores, la temperatura fue tomada en tres momentos, en la recolección de agua en el pozo, antes de iniciar la filtración de agua y en el agua filtrada de ambos filtros.

3.5.4. Método de Análisis de Laboratorio.

Se realizaron análisis de arsénico, hierro, fosfato y turbiedad para evaluar el comportamiento de los filtros. Para monitorear cambios en la calidad del agua filtrada se realizaron análisis en pH, conductividad eléctrica, potencial redox y temperatura. El procedimiento utilizado para el análisis es detallado a continuación.

a. Arsénico.

La medición de arsénico se realizó por medio del método de GENERACIÓN DE HIDRUROS CON ARSEATOR. Este procedimiento mide únicamente arsénico total, el cual es transformado en su hidruro correspondiente con boro-hidruro de sodio en medio ácido, generando el gas arsina que es retenido en el filtro de sulfuro de hidrógeno.

Materiales:

- ✓ Arsenator
- ✓ Trampa triple.
- ✓ Slides rojo y negro.
- ✓ Erlenmeyer boca esmerilada de 125ml.
- ✓ Frasco de almacenamientos de filtro para slides rojos y negros.
- ✓ Pinza para colocar los filtros en los slides.
- ✓ Bolsa de eliminación para filtros después de realizado el análisis.
- ✓ Hisopos para lavar los erlenmer.
- ✓ Probeta graduada de 50ml.
- ✓ Pizeta.

Reactivos:

- ✓ Filtros de sulfuro de hidrógeno.
- ✓ Reactivo ácido sulfámico, (A1).
- ✓ Tabletas de boro hidruro de sodio, (A2).
- ✓ Filtro de retención de arsénico (como arsina).

- ✓ Filtro de retención otros gases.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Jabón para lavado de la cristalería.

Procedimiento de Análisis.

- Se abre el slide color negro y se coloca un filtro del frasco con etiqueta negra, asegurándose colocar correctamente el filtro en la sección rectangular del slide. Esta precaución garantizará un buen resultado. Se prepara siempre un slide extra que servirá para calibrar el equipo.
- Se abre el slide color rojo y coloca un filtro del frasco con etiqueta roja, asegurándose colocar correctamente el filtro en la sección rectangular del slide. Esta precaución garantizará un buen resultado.
- Se inserta el filtro de sulfuro de hidrógeno en la parte inferior cilíndrica de la trampa triple.
- Se inserta el slide negro (con su respectivo filtro) en la ranura inferior de la parte rectangular de la trampa triple.
- Se inserta el slide rojo (con su respectivo filtro) en la ranura superior de la parte rectangular de la trampa triple.
- Se adiciona el reactivo A1, asegurándose que no queden residuos de este reactivo en las paredes del erlenmeyer.
- Se mide 50 ml de muestra del agua (cruda o tratada) y se adicionan en el erlenmeyer boca esmerilada.
- Se enciende el Arsenator, presionando cualquiera de las teclas con los símbolos * ó #.
- Se esperan unos segundos hasta que aparezca en pantalla **Insert Slide** y se introduce el slide negro que contiene el papel filtro calibrador.
- Se adiciona el reactivo A2 al erlenmeyer e inmediatamente se tapa el erlenmeyer con la trampa triple.

- Inmediatamente después de haber tapado el erlenmeyer se retira del Arsenator el slide negro con el papel filtro calibrador. En este momento el cronómetro del equipo empezará a marcar el tiempo de duración del análisis de 20 minutos.
- Después de transcurridos los 20 minutos del análisis se retira la trampa triple del erlenmeyer.
- Se retira el slide negro de la trampa triple y se introduce en el Arsenator. Después de unos segundos en la pantalla del equipo se mostrará la concentración de arsénico presente en la muestra.
- Se retira el slide del Arsenator y se apaga presionando al mismo tiempo las teclas *y #.
- Finalmente, se eliminan los filtros de los slides (negro y rojo) y se depositan en la bolsa plástica.

b. Hierro.

El análisis de hierro fue realizado por el Laboratorio de Físico-Química de aguas naturales del CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del standard methods. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó a 4 °C en un termo con tiempo máximo de almacenaje de 28 horas.

c. Turbiedad.

La turbiedad del agua de pozo fue realizada el Laboratorio de Físico-Química de aguas naturales de la UNI, siguiendo el procedimiento del standard methods, para lo cual la muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración durante el traslado.

d. pH.

Se determinó pH por el método Potenciómetro; aplicable para la medición de pH en muestras de agua potable, agua superficial y aguas residuales domésticas e industriales en un rango de 4 a 11. El pH se tomó en el agua de pozo *in-situ*, en agua de entrada y en agua filtrada. El procedimiento empleado es el siguiente:

Instrumento/Material.

- ✓ pH metro marca ori3n 250.
- ✓ Beacker de 250mL.
- ✓ Papel blando.

Reactivos.

- ✓ 3 soluciones buffer: 4,00, 7,00 y 10,00.
- ✓ Soluci3n KCl 3M saturado con cloruro de plata.
- ✓ Agua destilada en pizeta.

Calibraci3n del m3todo.

- ✓ Encender el equipo.
- ✓ Preparar los frascos con soluci3n tamp3n pH 7, 4 y 10.
- ✓ Presionar la tecla doble funci3n y presionar CAL.
- ✓ Se observa en el display que el equipo solicita el tamp3n recomendado pH 7.
- ✓ Se coloca el frasco sumergiendo el electrodo dentro de 3l y se presiona ENTER.
- ✓ En un lapso de (0:04 - 0:10) segundos reconoce el buffer.
- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y se seca con el papel tis3 (Kleenex) moderadamente, teniendo en cuenta no tocar demasiado el ojo del electrodo de pH.
- ✓ Luego solicita el tamp3n recomendado pH 4.
- ✓ Se presiona ENTER al cabo de 0:04 segundos a 0:10 segundos reconoce el buffer.
- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y se seca con el papel tis3 (Kleenex).
- ✓ Luego solicita el tamp3n recomendado pH 10.
- ✓ Se presiona ENTER al cabo de de 0:04 segundos a 0:10 segundos reconoce el buffer.
- ✓ Una vez que el pH-metro ha le3do los tres buffer se construye una curva con datos de la pendiente.

- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y se seca con el papel tisú (Kleenex).

Análisis de la muestra.

- ✓ Tomar una cantidad de 150mL de muestra en un beacker de vidrio de 250 ml.
- ✓ Sumergir cuidadosamente los electrodos en el beacker.
- ✓ Esperar una lectura estable del equipo.

e. Conductividad Eléctrica.

El método para la medición de conductividad eléctrica es través de celdas de platino y es aplicable en muestras de agua potable, agua superficial, agua subterránea y agua industrial. La conductividad eléctrica del agua de pozo fue realizada por analista del Laboratorio F-Q Aguas Naturales de la UNI, siguiendo el procedimiento del standard métodos. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración durante el traslado.

f. Potencial redox.

La medición del potencial redox representa la relativa intensidad de las condiciones oxidantes y reductoras de las soluciones y su valor es proporcional al valor de pH.

Equipo/Reactivos:

- ✓ Solución standard ORP (Ozone redox potential).
- ✓ Agua destilada.
- ✓ pH metro thermo ORION modelo 250.
- ✓ Probeta de 50mL.
- ✓ Beacker de 100mL.

Procedimiento de calibración:

- ✓ El equipo se puso en la opción Eh.
- ✓ Se procedió a lavar electrodo con agua destilada.
- ✓ Se secó con kleenex y se introdujo en la solución standard ORP.

- ✓ Se presionó doble función CAL para calibrarlo.
- ✓ Se verifica calibración entre $+ 420 \text{ mV} \pm 3 \text{ mV}$.

Análisis de la muestra:

- ✓ Se toma muestra en el beacker y se introduce el electrodo de mercurio y se procede a la lectura.

g. Temperatura.

La temperatura del agua de pozo se tomó *in-situ* con un Termómetro (-50°C a 150°C) marca FISHER. En el agua de entrada y filtrada se tomó diario en lugar de filtración. El equipo de medición se insertaba directamente en la muestra y se tomaba la lectura.

h. Fosfato.

El análisis de fosfato fue realizado por analista del laboratorio de aguas claras del CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del standard methods. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración a 4°C en un termo con tiempo máximo de almacenaje de 28 horas.

3.6. Valoración del comportamiento de los filtros.

Los parámetros y criterios utilizados por Torres, S. E. (2006), para evaluar tecnologías para remover arsénico de uso familiar, se retomaron para determinar las debilidades, fortalezas y costos de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado, con base en los resultados encontrados durante el período de evaluación del estudio.

Las principales referencias bibliográficas para la evaluación de los filtros son las siguientes:

- ✓ En el KANCHAN versión GEM 505 la eficiencia de remoción de arsénico es de 95 %, flujo de agua de (15-20) L/h, remoción de hierro y turbiedad de 95 % y costo de construcción de US\$15,73.
- ✓ En el SONO Filter MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935, 2002. La eficiencia de remoción es de 95 %, flujo de agua de (20-30) L/h, remoción de hierro de 95 % y

costo de construcción de US\$ (35-40). No se obtuvo dato eficiencia de remoción de turbiedad.

3.6.1. Eficiencia de remoción.

Se evaluó la eficiencia de remoción de arsénico, turbiedad y hierro. Los criterios de evaluación fueron muy alta: 90 % - 100 %; alta: 60 % - 90 %; media: 40 % - 60 %, baja: 0 % - 40 %. Se utilizó la siguiente escala para expresar valoración de la eficiencia de remoción:

- 4=muy alta.
- 3=alta.
- 2=media.
- 1=baja.

3.6.2. Tasa de filtración.

Se evaluó el tiempo de espera para obtener 45 litros de agua recomendado para una familia de 6 personas, según la OMS. La escala utilizada para expresar la valoración de la tasa de filtración es la siguiente:

- 5=<135min.
- 4= 135min-405min.
- 3=405min-810min.
- 2=810min-1350min.
- 1=>1350min.

3.6.3. Operación de los filtros.

Se evaluó la resistencia de los materiales que componen cada filtro a la manipulación diaria. La escala utilizada para expresar la valoración de la operación de los filtros es la siguiente:

- 4=muy alta.
- 3=alta.
- 2=media.
- 1=baja.

3.6.4. Riesgo operacional.

El parámetro evaluado fue el uso o no de químico para la remoción de arsénico y que represente riesgo al operador del filtro. La escala utilizada para expresar la valoración del riesgo operacional de los filtros es la siguiente:

- 1=muy alta.
- 2=alta.
- 3=media.
- 4=baja.

3.6.5. Impacto ambiental.

Se evaluó el riesgo que representan los desechos, específicamente el lodo y las aguas de lavado, al medio ambiente. La escala utilizada para expresar la valoración del riesgo operacional de los filtros es la siguiente:

- 1=muy alta.
- 2=alta.
- 3=media.
- 4=baja.

3.6.6. Inversión inicial.

Se evaluó respecto a los costos de construcción de los filtros. La escala utilizada para expresar la valoración del riesgo operacional de los filtros es la siguiente:

- 5=<US\$10.
- 4=US\$10-US\$30.

- 3=US\$30-US\$60.
- 2=US\$60-US\$100.
- 1=>US\$100.

3.6.7. Adaptabilidad.

Se evaluó la disponibilidad y uso de materiales locales para la construcción de los filtros. La escala utilizada para expresar la valoración de la adaptabilidad de los filtros es la siguiente:

- 4=muy alta.
- 3=alta.
- 2=media.
- 1=baja.

Con esta metodología la mejor puntuación es otorgada al filtro que registró mejores resultados en las variables de estudio. La valoración final se definirá de acuerdo a la tabla siguiente.

Tabla 20. Criterio de valoración general de la evaluación del comportamiento de los filtros.

Valoración general	
Muy alta	4
Alta	3
Media	2
Baja	1

IV. RESULTADOS.

La investigación consistió fundamentalmente en evaluar el comportamiento de dos tecnologías para remover arsénico a nivel familiar en el rango de 80 µg/L – 100 µg/L de arsénico total. Las tecnologías escogidas fueron filtro KANCHAN versión GEM 505 y SONO filter MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935, 2002. El diseño de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado puestos a prueba en la investigación, se basó en la configuración original de las tecnologías escogidas, (planos en anexo 4 y 5).

4.1. Características del agua de pozo.

Los valores de pH y potencial redox se graficaron en el diagrama Eh-pH del arsénico, identificando que el arsénico predominante en el agua es arsénico V en la especie $(\text{HAsO}_4)^{-2}$, coincidiendo con lo planteado por (Barragne-Bigot, 2004).

Tabla 21. pH y potencial redox ajustado de muestra de agua de pozo.

Muestras	Potencial de hidrogeno (pH)	P. redox (mV) (Escala de mercurio)	P. redox (v) ajustado (Escala de Plata)
1	6,85	380	0,60
2	7,16	323	0,55
3	7,09	320	0,54
4	7,13	322	0,54
5	7,03	318	0,54
6	7,16	323	0,55
7	6,79	377	0,60
8	7,20	325	0,55
9	6,73	373	0,60
10	6,80	377	0,60

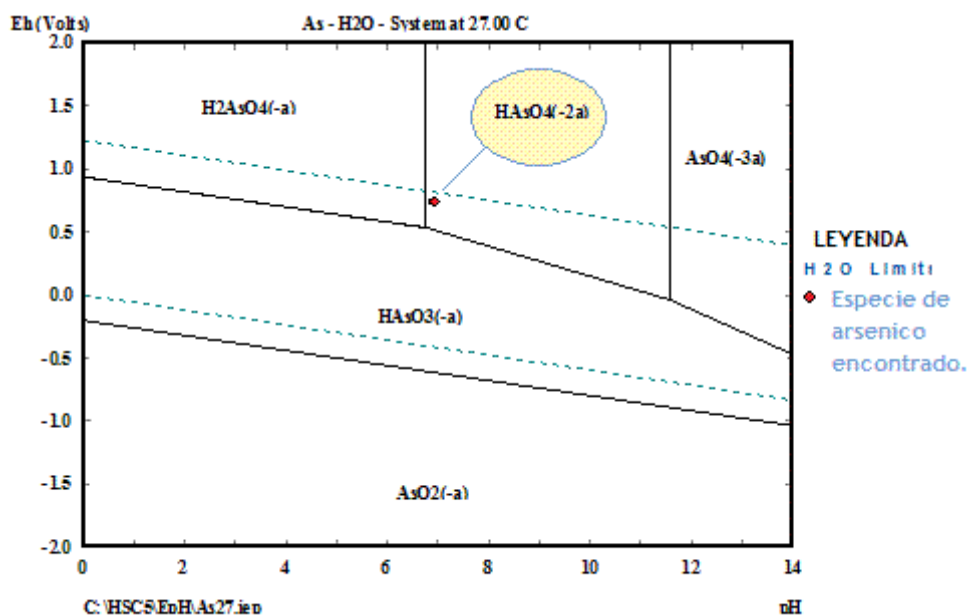


Figura 15. Distribución en el agua de la especie de arsénico en función de pH-Eh y a una concentración total de 10^{-6} mol/L de arsénico.

El agua de pozo presentó un rango de concentración de 80 $\mu\text{g/L}$ – 89 $\mu\text{g/L}$ con una media de 83 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total.

Tabla 22. Valores de arsénico total en agua de pozo.

Fuente de agua: Pozo excavado con bomba de mecate.			
Uso: Familiar			
Comunidad: Mina La India			
Semana de muestreo	Concentración arsénico ($\mu\text{g/L}$)	Método de análisis	de
04/10/2008	81	Generación de hidruros, utilizando el equipo ARSENATOR	de
11/10/2008	80		
18/10/2008	82		
25/10/2008	83		
01/11/2008	86		
22/11/2008	86		
29/11/2008	82		
06/12/2008	89		
13/12/2008	81		
10/01/2009	82		

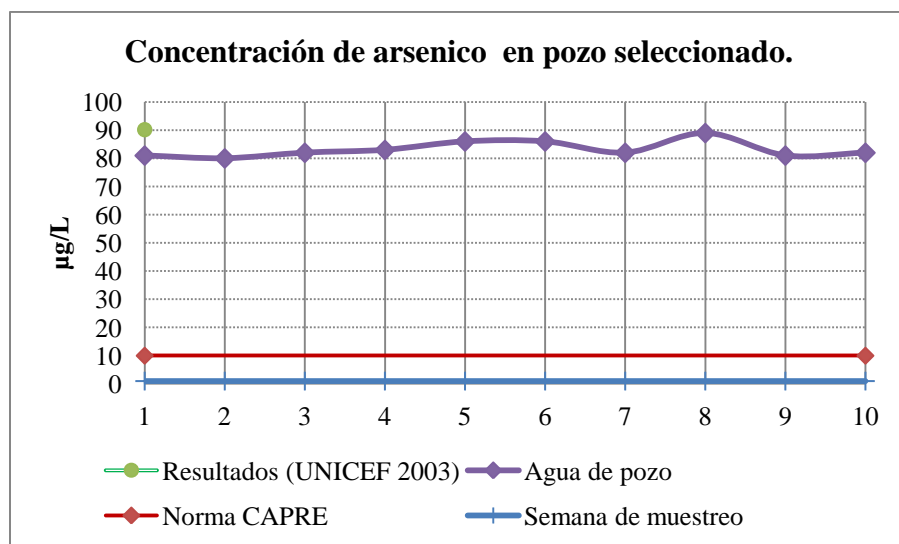


Figura 16. Comportamiento semanal de la concentración de arsénico en agua de pozo.

Tabla 23. Parámetros de agua de pozo.

Semana	pH	Conductividad eléctrica (ms/cm)	Temperatura (°c)	Potencial redox (mv)
1	6,85	828	27,40	380
2	7,16	882	27,50	323
3	7,09	873	27,00	320
4	7,13	878	27,40	322
5	7,03	865	28,30	318
6	7,16	882	27,40	323
7	6,79	836	28,30	377
8	7,20	891	27,40	325
9	6,73	828	29,20	373
10	6,80	837	27,40	377

Tabla 24. Concentración de hierro y fósforo en agua de pozo.

Parámetro	Unidad	Valor de la concentración	Valor límite permisible (norma CAPRE, 1994)
Hierro Total	mg/L	0,050	0,3
		0,078	0,3
Fósforo Total	mg/L	0,270	NE

NE: No establecido por la Norma.

Ver en anexo 2, Certificado de análisis (08/01/2009) del CIEMA-UNI.

4.2. Eficiencia de los filtros.

4.2.1. Remoción de arsénico.

El filtro KANCHAN operó con flujo discontinuo en 3 ciclos de filtración. El período de filtración del SONO filter modificado se interrumpió en la octava semana de filtración. En las tablas 34, 36, 37 y 38, se detalla de forma diaria la concentración de arsénico removida y remanente en el agua filtrada, ver en anexo 1. Los resultados promediados semanalmente se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 25. Remoción de arsénico de SONO filter modificado y filtro KANCHAN.

Semana	As agua de pozo (µg/L)	As agua filtrada (µg/L)									
		Sono filter		Kanchan							
P	R	I	M	E	R	C	I	C	L	O	
1				81		40			5		
2				80		39			7		
3				82		39			mld		
4				83		44			mld		
5				86		39			mld		
6				86		39			mld		
7				82		43			mld		
8				89		41			mld		
9				81		-			3		
10				82		-			mld		
S	e	g	u	n	d	o	c	i	c	l	o
1				82		-			mld		
2				89		-			mld		
3				81		-			mld		

Semana	As agua de pozo ($\mu\text{g/L}$)	As agua filtrada ($\mu\text{g/L}$)	
		Sono filter	Kanchan
4	82	-	mld
T e r c e r c i c l o			
1	82	-	mld
2	89	-	mld
3	81	-	mld
4	82	-	mld

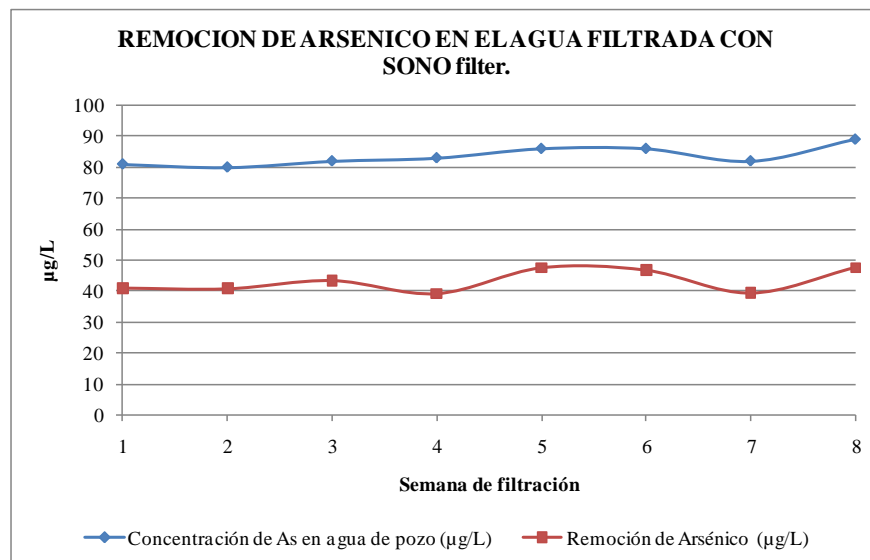


Figura 17. Remoción de arsénico con SONO filter modificado.

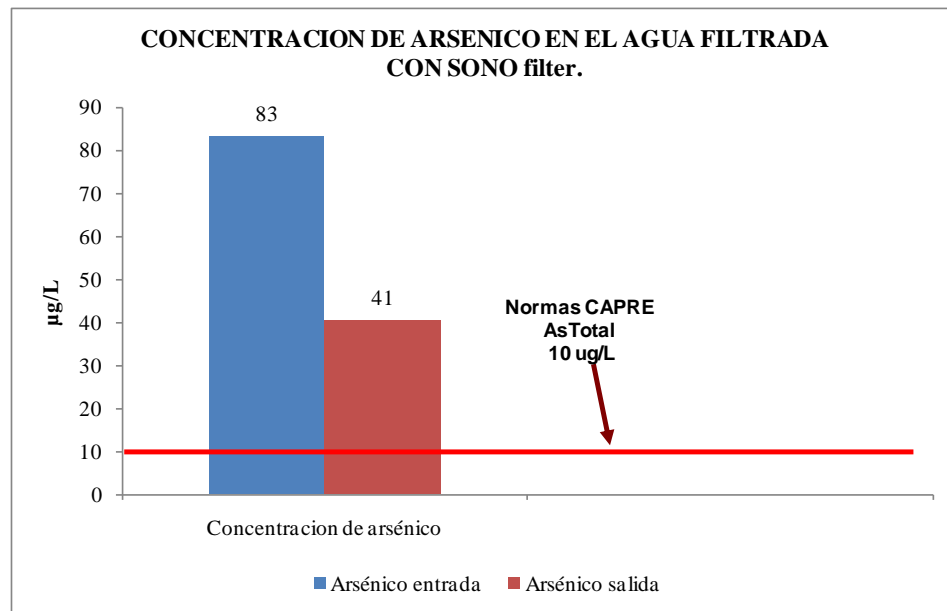


Figura 18. Concentración de arsénico en el agua filtrada con SONO filter modificado.

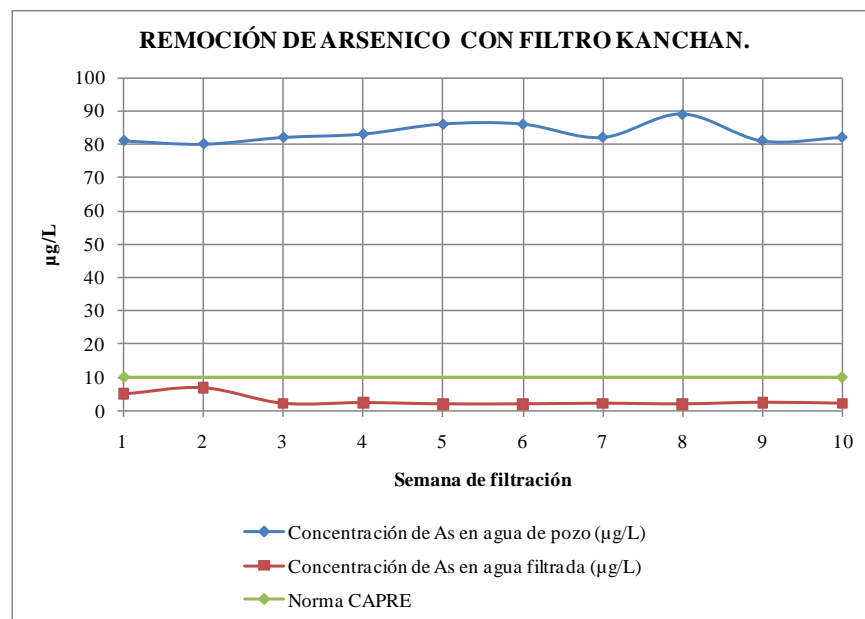


Figura 19. Remoción de arsénico con filtro KANCHAN.

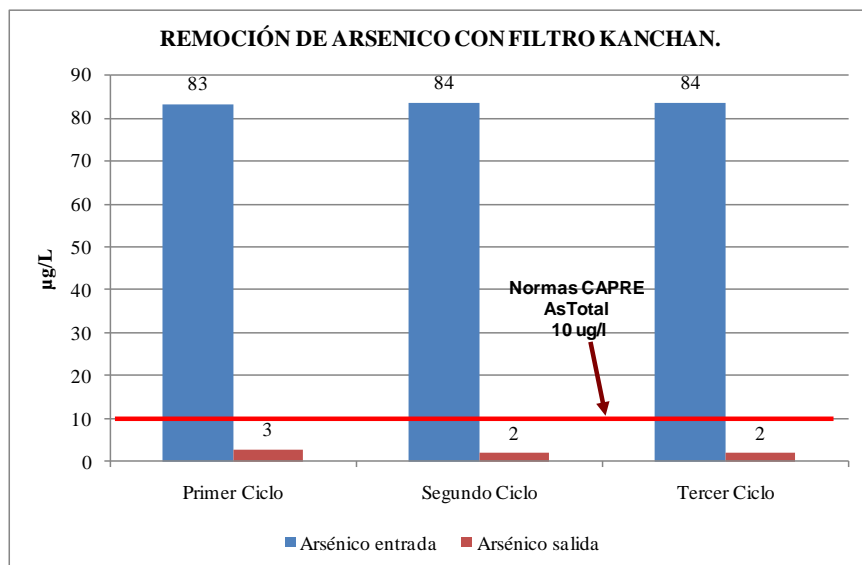


Figura 20. Remoción de arsénico vs. norma CAPRE, 1994 con filtro KANCHAN.

4.2.2. Tasa de filtración.

Los resultados promediados semanalmente se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 26. Tasa de filtración de SONO filter modificado y filtro KANCHAN.

Semana	Volumen filtrado acumulado (L)		Duración del filtrado (min)		Tasa de filtración (L/h)	
	Sono filter	Kanchan	Sono filter	Kanchan	Sono filter	Kanchan
P R I M E R C I C L O : 10 litros						
1	40	40	38	48	15,82	12,42
2	80	80	42	50	14,46	11,95
3	130	130	40	50	15,19	12,06
4	180	180	42	49	14,35	12,16
5	220	220	40	50	14,89	12,09
6	260	260	43	51	14,01	11,83
7	310	310	46	86	13,20	7,85
8	360	360	45	85	13,33	8,27
9	-	400	-	48	-	12,75

Autor: Ariel Aragón González.

Semana	Volumen filtrado acumulado (L)		Duración del filtrado (min)		Tasa de filtración (L/h)	
	Sono filter	Kanchan	Sono filter	Kanchan	Sono filter	Kanchan
10	-	450	-	50	-	11,98
S e g u n d o c i c l o : 20 litros						
1	-	100	-	178	-	8,3
2	-	200	-	190	-	8,1
3	-	280	-	90	-	13,4
4	-	380	-	89	-	13,4
T e r c e r c i c l o : 30 litros						
1	-	150	-	306	-	8,05
2	-	300	-	295	-	7,81
3	-	420	-	138	-	13,05
4	-	570	-	141	-	12,78

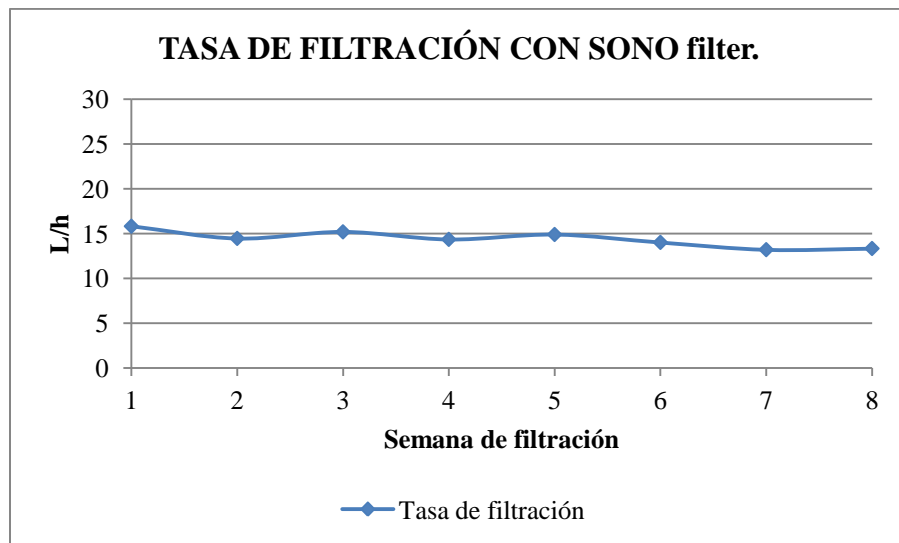


Figura 21. Tasa de filtración con SONO filter modificado.

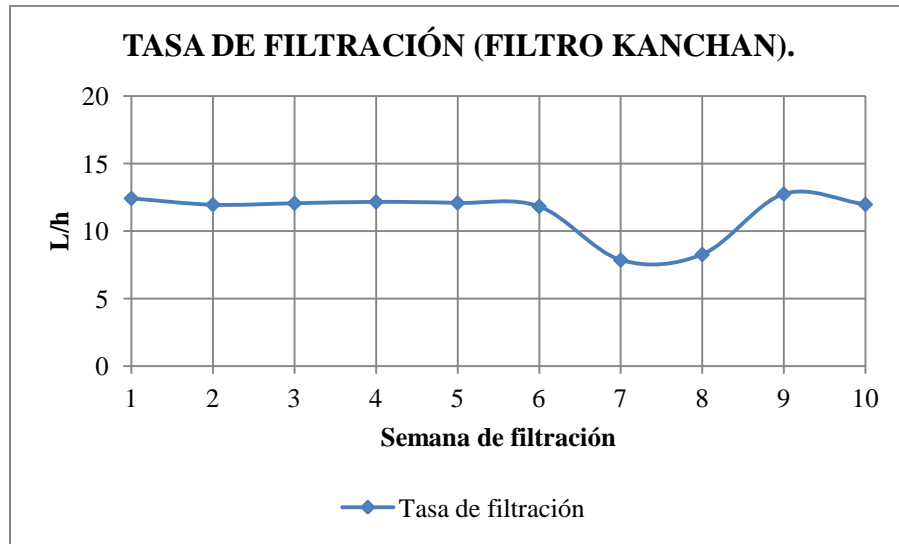


Figura 22. Tasa de filtración con filtro KANCHAN.

4.2.3. Turbiedad.

La turbiedad en el agua de entrada y el agua filtrada se detalla en la tabla.

Tabla 27. Remoción de turbiedad con filtro KANCHAN y SONO filter modificado.

Semana	Turbiedad (NTU)			
	Sono filter		Kanchan	
	entrada	salida	entrada	salida
P r i m e r c i c l o				
1	0,111	15,300	0,111	0,098
2	0,098	5,350	0,102	0,085
3	0,102	4,780	0,102	0,089
4	0,109	6,970	0,109	0,096
5	0,059	3,510	0,059	0,039
6	0,073	2,440	0,073	0,06
7	0,068	3,600	0,068	0,055
8	0,046	4,190	0,046	0,033
9	-	-	0,049	0,036
10	-	-	0,035	0,044

Semana	Turbiedad (NTU)			
	Sono filter		Kanchan	
	entrada	salida	entrada	salida
S e g u n d o c i c l o				
1	-	-	0,057	0,064
2	-	-	0,042	0,043
3	-	-	0,037	0,044
4	-	-	0,048	0,055
T e r c e r c i c l o				
1	-	-	0,043	0,045
2	-	-	0,042	0,063
3	-	-	0,036	0,038
4	-	-	0,046	0,048

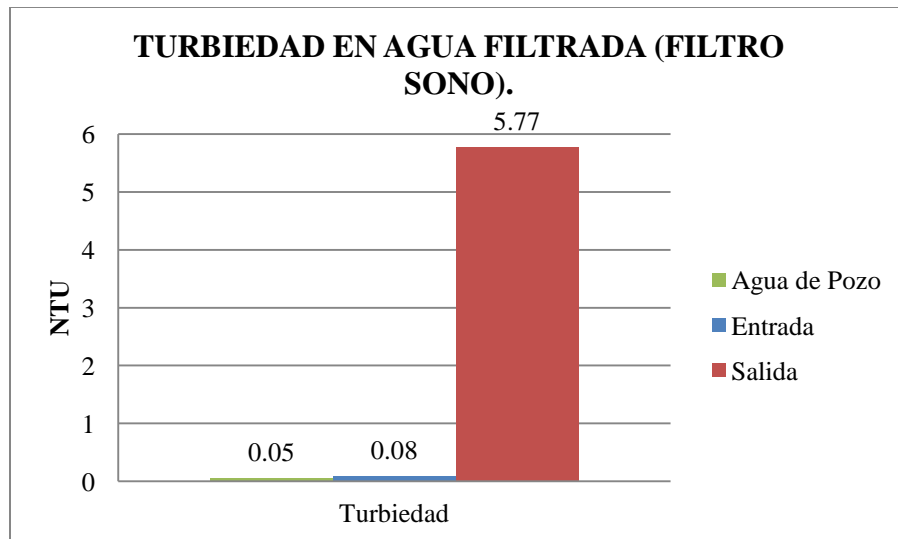


Figura 23. Turbiedad en agua filtrada con SONO filter modificado.

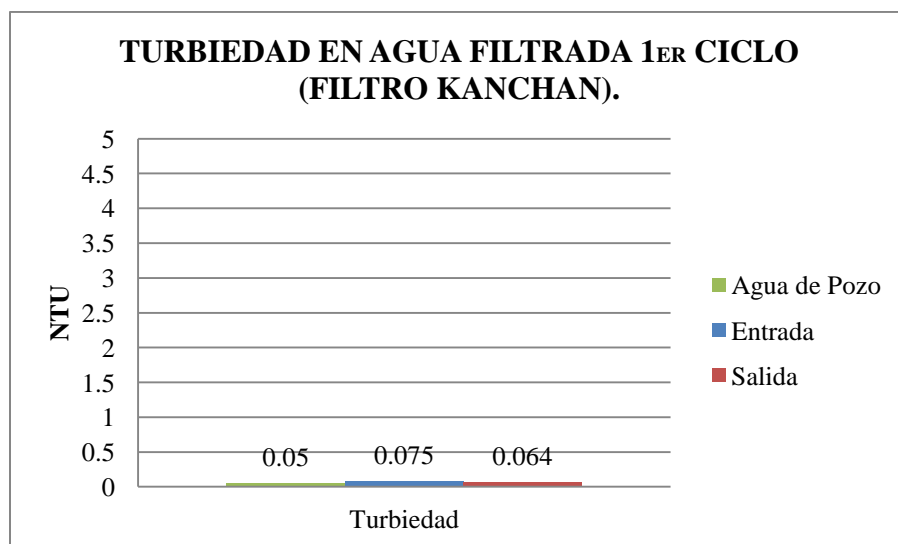


Figura 24. Turbiedad en agua filtrada con filtro KANCHAN.

4.2.4. Hierro.

El análisis de hierro en agua de pozo y agua filtrada del filtro KANCHAN se detalla en la tabla.

Tabla 28. Concentración de hierro en agua de pozo y filtrada del filtro KANCHAN.

Parámetro	Unidad	Concentración en agua de pozo	Concentración en agua filtrada	Límite permisible
Hierro Total	mg/L	0,064	0,143	0,3

Ver en anexo 2, Certificado de análisis (13/03/2009) del CIEMA-UNI.

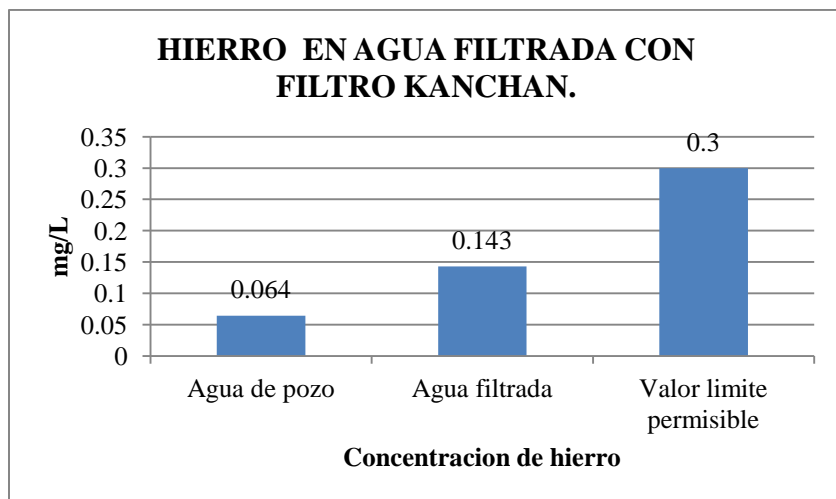


Figura 25. Concentración de hierro en agua filtrada con filtro KANCHAN.

4.2.5. Características del agua filtrada.

Tabla 29. Parámetros de calidad de agua filtrada con SONO filter modificado.

Semana	pH		Conductividad eléctrica (ms/cm)		Potencial redox (mv)		Temperatura (°c)	
	entrada	salida	entrada	salida	entrada	salida	entrada	salida
P r i m e r c i c l o								
1	7,29	7,86	870	1100	400	482	26,4	25,9
2	7,31	7,97	884	1046	383	465	26,9	26,4
3	7,30	7,93	879	1073	383	481	26,4	26,6
4	7,48	7,85	884	1090	385	483	26,2	25,8
5	7,33	7,98	889	1182	387	470	25,0	24,5
6	7,30	7,94	888	1196	384	488	25,0	24,5
7	7,40	8,01	871	1056	386	479	26,7	24,7
8	7,33	7,94	892	1038	404	468	24,8	24,8

Tabla 30. Parámetros de calidad de agua filtrada con filtro KANCHAN.

Semana	pH		Conductividad eléctrica (ms/cm)		Potencial redox (mv)		Temperatura (°c)	
	entrada	salida	entrada	salida	entrada	salida	entrada	salida
1	7,29	7,59	870	1023	400	488	26,4	25,9
2	7,31	7,58	884	947	383	476	26,9	26,4
3	7,30	7,65	879	979	383	477	26,4	26,6
4	7,48	7,70	884	1037	385	479	26,2	25,8
5	7,33	7,68	889	1083	387	475	25,0	24,5
6	7,30	7,70	888	1083	384	489	25,0	24,5
7	7,40	7,73	871	1003	386	471	26,7	24,7
8	7,33	7,64	892	1005	404	462	24,8	24,8
9	7,47	7,72	874	1027	393	481	26,4	26,6
10	7,41	7,71	867	1021	393	478	24,6	24,5
S e g u n d o c i c l o								
1	7,40	7,82	871	991	386	468	26,73	24,7
2	7,33	7,80	892	930	404	490	24,77	24,7
3	7,47	7,85	874	766	393	490	26,35	24,6
4	7,41	7,84	867	890	393	491	24,58	25,0
T e r c e r c i c l o								
1	7,40	7,85	871	952	386	469	26,73	24,8
2	7,33	7,80	892	883	404	450	24,77	24,5
3	7,47	7,89	874	796	393	492	26,35	24,6
4	7,41	7,82	867	866	393	496	24,58	25,0

En las tablas 35, 39, 40, 41 en anexo 1, se detalla de forma diaria los registros de los parámetros de calidad del agua.

4.2.6. Evaluación cuantitativa de los filtros.

La evaluación cuantitativa se realizó en base a los resultados y experiencia obtenida en la construcción y operación de los filtros construidos, aplicando los parámetros y criterios de valoración de Torres, 2006. También se valoró las tecnologías originales aplicando las referencias bibliográficas encontradas.

Tabla 31. Evaluación del comportamiento de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado.

Parámetros	Sono filter		Kanchan	
	Bibliográfica	Construido	Bibliográfica	Construido
Remoción de arsénico	4	2	4	4
Remoción de turbiedad	?	?	4	4
Remoción de hierro	4	?	4	4
Tasa de filtración	5	4	4	4
Operación y mantenimiento	4	4	4	4
Riesgo operacional	4	4	4	4
Impacto ambiental	4	3	4	3
Inversión inicial	3	4	4	4
Adaptabilidad	3	1	4	4
Media	3,88	3,14	4,00	4,00

?= No se obtuvieron datos.

4.3. Análisis e Interpretación de Resultados.

La especie de arsénico que predomina en el agua utilizada para la investigación es arsénico V en la especie $(\text{HAsO}_4)^{-2}$. En el filtro KANCHAN construido, la eficiencia de remoción de arsénico registrada en el primer ciclo fue de 87,50 % - 97,75 %, con media de 96,6 %, removiendo entre 70 $\mu\text{g/L}$ y 87 $\mu\text{g/L}$ con media de 80 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total, en el segundo y tercer ciclo el rango fue de 97,53 % - 97,75 %, con media de 97,6 %, removiendo entre 79 $\mu\text{g/L}$ y 87 $\mu\text{g/L}$ con media de 82 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total. En el SONO filter modificado construido la eficiencia de remoción de arsénico registró un rango de 34,1 % - 68,5 % con media del 51,5 %, removiendo entre 28 $\mu\text{g/L}$ y 62 $\mu\text{g/L}$ con media de 43 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total. Las concentraciones de arsénico menores de 2 $\mu\text{g/L}$ en el agua filtrada, no pudo ser verificada, en vista que el equipo utilizado tiene un rango de medición entre 2 $\mu\text{g/L}$ a 100 $\mu\text{g/L}$.

La tasa de filtración del filtro KANCHAN en el primer ciclo de filtración registró un rango de 5,2 L/h - 14 L/h con media de 11,3 L/h, segundo ciclo de filtración con rango de 4,43 L/h - 14,12 L/h con media de 10,7 L/h y tercer ciclo de filtración: rango de 4,41 L/h - 13,7 L/h con media de 9,9 L/h. Debido a que uno de los orificios de la pana del filtro KANCHAN se obstruyó por la acumulación de lodos en la séptima y octava semana la tasa de filtración registró los valores más bajos. El SONO filter modificado registró una tasa de filtración en el rango de 11,71 L/h - 18,75 L/h con media de 14,4 L/h.

La turbiedad del agua de pozo es de 0,05 NTU sin embargo el agua de entrada a los filtros presentó rango de 0,04 NTU - 0,11 NTU con media de 0,075 NTU. En el primer ciclo del filtro KANCHAN la turbiedad del agua filtrada estuvo en el rango de 0,03 NTU - 0,10 NTU con media de 0,064 NTU, segundo ciclo con rango de 0,04 NTU - 0,07 NTU con media de 0,051 NTU, tercer ciclo con rango de 0,04 NTU - 0,08 NTU con media de 0,048 NTU. La turbiedad del agua filtrada en el SONO filter modificado presentó un rango de 2,44 NTU - 15,30 NTU con media de 5,59 NTU.

El análisis de hierro se realizó puntual en el agua filtrada del KANCHAN registrando un valor de 0,143 mg/L. Se realizaron dos análisis de hierro en el agua de pozo (0,050 mg/L y

0,078 mg/L). No se realizó análisis del hierro en el agua filtrada del SONO filter modificado debido a la suspensión de la operación.

El análisis de los parámetros del agua filtrada en el SONO filter modificado registró rangos de pH 7,73 - 8,37, conductividad eléctrica 883 ms/cm – 1269 ms/cm, potencial redox 416 mV – 535 mV y temperatura 24,33° C - 26,90° C. El análisis de los parámetros del agua filtrada en el filtro KANCHAN registró rangos de pH 7,38 - 8,08, conductividad eléctrica 681 ms/cm – 1174 ms/cm, potencial redox 389 mV – 602 mV y temperatura 24,33° C - 26,90° C. Los cambios de estos parámetros durante el período de almacenamiento semanal no fueron analizados en este estudio.

Se analizaron los datos registrados en los parámetros del agua filtrada, estos son: (pH, conductividad eléctrica, potencial redox, temperatura y turbiedad) y no existe correlación de estos con la eficiencia de remoción de arsénico, tasa de filtración y volumen acumulado de agua filtrada de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado, ver tabla 33 en anexo 1.

El tiempo de retención o contacto se diseñó en ambos filtros para 20 minutos. En este punto el filtro KANCHAN construido difiere del diseño original del KAF versión GEM 505, que establece eventualmente abrir en el fondo de la pana 40 orificios distribuidos, Ngai y colaboradores 2006, lo cual daría como resultado un tiempo de contacto de 1,38 segundos.

La evaluación de los filtros se realizó aplicando los resultados obtenidos en los parámetros siguientes: remoción de arsénico, turbiedad, hierro, tasa de filtración, operación y mantenimiento, riesgo operacional, impacto ambiental, inversión inicial y adaptabilidad. El filtro construido de la tecnología KANCHAN obtuvo un valor de 4,00 en comparación con el filtro construido de la tecnología SONO filter con un valor de (3,14). Comparándolos con los filtros originales el resultado en filtro KANCHAN (Original=4,00, Construido=4,00), SONO filter (Original=3,88, Construido modificado =3,14).

4.4. Limitaciones del Estudio.

1. Las mediciones de arsénico en el agua no se pudieron comprobar con otro método de análisis, como es la técnica de horno de grafito de espectrometría de absorción atómica (AAS) por estar en mal estado el equipo que dispone el CIEMA-UNI, durante la fase de experimento del estudio.
2. La remoción de arsénico total en concentraciones más baja que el rango de lectura del ARSENIATOR marca Wagtech (2 µg/L a 100 µg/L) no se pudieron determinar, lo cual no significa que el arsénico en concentraciones menor que 2 µg/L no está presente en el agua filtrada. Estos valores se representaron como mld (Menor que el límite de detección del equipo Arsenator).
3. No se contó con la matriz de compuesto férrico que contiene el SONO filter, por lo que no logró evaluarse satisfactoriamente el comportamiento de dicho filtro.
4. No se pudo determinar las variaciones de calidad del agua cruda en las épocas de verano e invierno.
5. Los filtros se evaluaron a nivel de laboratorio y no en el sitio por problemas de traslados de los equipos de medición.
6. El tiempo disponible de evaluación fue de 4 meses, esto no permitió ver el comportamiento de los clavos y la colmatación del lecho filtrante.
7. Muy pocos análisis de hierro total realizadas al agua filtrada, así como de análisis de fosfatos al agua cruda debido a limitaciones económicas.

V. CONCLUSIONES.

1. Los filtros KANCHAN y SONO filter modificado fueron evaluados con arsénico V en la especie $(\text{HAsO}_4)^{-2}$ que predominó en el agua de acuerdo a los resultados de la especiación del arsénico realizada, ésta especie es característico de aguas subterráneas en condiciones aeróbicas. Según la bibliografía consultada, la capacidad de ionización del arsénico (V) le permite combinarse fácilmente con otros compuestos, lo cual hace que su remoción por diversos métodos sea más eficiente en comparación con la del arsénico (III).
2. El filtro KANCHAN demostró que puede ser construido con materiales locales y de operación sencilla, haciéndolo apto para el tratamiento de agua contaminada con arsénico en la concentración de $80 \mu\text{g/L} - 100 \mu\text{g/L}$ presente en el pozo seleccionado de la comunidad Mina La India. Durante el período de prueba, los resultados de la investigación demuestran que puede asegurar una remoción de arsénico en el agua inferior al valor permisible por la norma CAPRE, 1994, que es de $10 \mu\text{g/L}$ para el agua de consumo humano, pudiendo ser una buena opción para las familias que están consumiendo agua contaminada con arsénico en el área de Mina La India y otras comunidades del país.
3. La baja eficiencia en la remoción de arsénico obtenida por el SONO filter modificado construido y evaluado se debió a una razón fundamental: Matriz compuesta de hierro (CIM) no disponible. Concluyendo que a pesar que este filtro ha obtenido buenos resultados en otros países, resultó ser más difícil la construcción en comparación con el KANCHAN ya que no se pudo obtener la CIM en el mercado nacional, para evaluar efectivamente su eficiencia en la remoción de la concentración de arsénico evaluada.
4. La buena adsorción del arsénico con tecnologías a base de hierro, como lo es el filtro KANCHAN, se logra llevando a cabo una buena oxidación de los clavos, que se forme una masa compacta de clavos y que estos no sean galvanizados.

5. La correcta selección de la arena de río con diámetro menor de 1 mm es de mucha importancia porque garantiza que el complejo hierro-arsénico sea interceptado en la superficie del lecho filtrante. El arsénico adsorbido por las partículas de hierro es atrapado en la superficie de la arena sin penetrar en las profundidades inferiores, Ghimire B, 2005. Para la investigación, las características de la arena de río seleccionada fueron: Porosidad 40,4 %, Coeficiente de uniformidad 2,22, Coeficiente de curvatura 1,54 y Permeabilidad 4,23E-02 cm/s.
6. La concentración de fosfato presente en el agua de pozo fue de 0,270 mg/L, lo cual supone la no competencia de este con el arsénico por el hidróxido de hierro. Según BCSIR, 2003, niveles de fosfato PO₄ alrededor de 10 mg/L, el cual es equivalente a aproximadamente a 3 mg/L de PO₄-P revelaron pobre desempeño en pruebas de campo en Bangladesh de 5 tecnologías para remover arsénico. También Ngai, expone que esto es posible si el fosfato está en concentración de más de 5 µg/L.
7. La evaluación del comportamiento de los filtros, en base a los parámetros de evaluación seleccionados, muestra que el valor más alto lo obtuvo el filtro construido de la tecnología KANCHAN, con un valor de 4,00 en comparación con el filtro construido de la tecnología SONO filter con un valor de (3,14), basándose en lo siguiente:
 - a. Eficiencia de remoción de arsénico: filtro KANCHAN >95 %, SONO filter construido modificado <51,5 %. El filtro KANCHAN, obtuvo concentración de arsénico en el agua filtrada menor de 10 µg/L, valor establecido como límite por la norma CAPRE, 1994.
 - b. La turbiedad del agua filtrada en el filtro KANCHAN registró una media general de 0,05 NTU cumpliendo satisfactoriamente con el límite máximo permisible de la norma CAPRE, 1994 que es de 5 NTU y manteniendo inalterada la turbiedad del agua de pozo que es de 0,05NTU. El SONO filter modificado registró turbiedad con media general de 5,59 NTU sobrepasando el límite de la norma CAPRE, 1994 e incrementando la turbiedad del agua de pozo. La alteración de la turbiedad en el

SONO filter modificado puede estar ligada a las altas concentraciones de arsénico obtenidas en el efluente, algunos autores señalan que no siempre existe una correlación entre la remoción de turbiedad y la remoción de arsénico, sin embargo, para una remoción de arsénico es un prerrequisito una buena remoción de turbiedad.

- c. La concentración de hierro total (0,143 mg/L) en el agua filtrada del filtro KANCHAN presentan un ligero incremento de 0,079 mg/L, con respecto a la concentración de hierro (0,064 mg/L) en el agua de pozo, sin embargo el valor registrado cumple con el valor máximo permisible (0,3 mg/L) establecido por la Norma CAPRE, 1994. No se determinaron exactamente las causas del incremento, podría estar relacionado con la concentración natural de hierro en la arena.
- d. De acuerdo a la tasa de filtración del filtro KANCHAN (11,2 L/h, 10,7 L/h, 10,3 L/h en los tres ciclos), el tiempo de espera para filtrar 45 litros de agua para una familia de 6 personas por día es de 4hr:24min. El SONO filter modificado obtuvo tasa de filtración de 14,4 L/h, el tiempo de espera para filtrar 45 litros es de 3hr:8min. En ambos filtros el tiempo de espera para obtener 45 litros de agua filtrada resultó un poco alto, con respecto a lo indicado en la bibliografía, ya que para el KANCHAN indica que puede filtrar 45 litros de agua entre 2hr:15m – 3hr:00min y el SONO filter entre 1hr:30min – 2h:15min.
- e. Ambos filtros son contruidos de materiales fuertes y no son complicados de operar. No necesitan químicos para realizar la remoción de arsénico, haciéndolo seguro en la operación diaria. Durante la operación no fue necesario extraer lodos o hacer lavado de lecho filtrante.
- f. El costo del filtro KANCHAN fue de C\$ 424,00 y el SONO filter modificado de C\$ 654,00, siendo más barata la construcción del filtro KANCHAN a la fecha de construcción que fue en el mes de octubre del 2008. En relación al costo del diseño original, ambos filtros estuvieron dentro del rango encontrado en la bibliografía. Esto no es representativo para implementación a escala real, puede que los costos de los materiales de construcción disminuyan si se construyera más de un filtro,

además, suma el aporte de la comunidad en mano de obra y la recolección de arena en los ríos locales.

- g. El filtro KANCHAN permitió ajustarse más al diseño original en relación al SONO filter. Los materiales y accesorios para la construcción del filtro KANCHAN son de fácil obtención en el medio nacional y de mas bajo costo, contrario al SONO filter el cual en su diseño original incluye el CIM, que no se encuentra disponible en el mercado nacional. Estas características le permite al filtro KANCHAN ser más adaptable a las condiciones del país.
8. Los datos registrados en los parámetros de calidad del agua (pH, temperatura y turbiedad) en el agua filtrada de los filtros KANCHAN y SONO filter modificado están dentro de los valores permisible de la norma CAPRE, 1994 para agua potable. No se cumple con la conductividad eléctrica, debido a que este es un parámetro elevado en el agua del pozo. Para el potencial redox la norma no establece límite de concentración en el agua potable.

5.1. Recomendaciones.

1. El éxito del filtro KANCHAN es el contacto del agua con los clavos, es por esto que es importante que permanezcan oxidados, especialmente, cuando el agua a tratar no es muy rica en oxígeno. Otro elemento importante tiene que ver cómo están físicamente arreglados en la pana de soporte, para optimizar el área de contacto, entre más compacto la masa de clavos, mas área de contacto. Como a nivel de sugerencia para futuros trabajos se recomienda que se haga con virutas de hierro, lo que puede aportar más seguridad en la eficiencia del filtro al aumentar el área de contacto.
2. Se recomienda para futuras investigaciones del KANCHAN utilizar tiempos de retención del agua en la pana de soporte de los clavos oxidados menores de 20 minutos. Con esto podría valorarse, cual es el tiempo máximo que los clavos oxidados proveen de la suficiente área de contacto para formarse el complejo hierro-

arsénico y determinar la máxima eficiencia del filtro lento de arena en la retención del complejo hierro-arsénico, de tal manera pueda determinarse la tasa de filtración óptima que pueda proveer de 45 litros de agua diario para una familia de 6 personas en un período de tiempo atractivo para la persona operadora del filtro en la familia rural. A manera de recomendación podría valorarse la eficiencia del filtro con una tasa de filtración entre 15 L/h – 30 L/h.

3. En la construcción del filtro KANCHAN se debe tener muy en cuenta que una vez que los clavos oxidados hayan cumplido su tarea de formar el complejo hierro-arsénico, la capa de arena con diámetro menor de 1 mm es la parte del filtro que realiza la función de cernido, intercepción y adherencia del arsénico en la superficie del lecho filtrante. La inadecuada selección y arreglo del lecho filtrante ocasionará que la eficiencia de remoción de arsénico se desmejore. Se recomienda seleccionar una buena fuente de arena de río que contenga poco limo, arcilla o tierra finamente dividida. Debe realizarse el análisis granulométrico de la arena y comparar los resultados con las características de la arena utilizada en la presente investigación o la que recomienda la bibliografía. Y por último, debe realizarse una buena limpieza de la arena antes de ser instalada ya que las arenas sucias aportan turbiedad al efluente, sirven de protección física de patógenos y tienen bajas porosidades que al progresar la carrera de filtración se compactan.
4. En la operación del filtro KANCHAN hay que tener en cuenta que puede ocurrir la obstrucción de los orificios de la pana de soporte de los clavos oxidados, en el caso se debe despejar los orificios con la ayuda de un clavo o alambre con diámetro similar. También, para mantener una tasa de filtración óptima se debe rellenar la pana de soporte de los clavos cuando la altura de la columna de agua este a la mitad de dicha pana. Otro aspecto importante es evitar que el agua que se vierte lave el óxido de los clavos, para lo cual se recomienda colocar piedras bolón o trozos de ladrillo que tienen la función de atenuar la fuerza erosiva del agua.

5. En esta investigación no se evaluó la remoción de patógenos ni se llevaron a operación los filtros a nivel familiar, lo cual representa un reto para investigadores e instituciones que están trabajando con familias campesinas que consumen agua contaminada con arsénico. La literatura encontrada aconseja que es recomendable dejar los 5 cm de agua sobre la superficie del lecho de filtración lenta del filtro KANCHAN de manera que provea el oxígeno que permita el desarrollo del biofilm el cual es un mecanismo que retira patógenos del agua. Se puede realizar una investigación para determinar la eficiencia de remoción de patógenos.
6. Para el tratamiento de agua contaminada con arsénico a través de estos filtros es importante tener en cuenta que es necesario la cloración del agua tratada como uno de los últimos pasos del tratamiento, a fin de eliminar los microorganismos patógenos que puedan contaminarla.
7. Para la implementación del filtro KANCHAN en las comunidades rurales se recomienda realizar análisis de concentración de arsénico y hierro al menos una vez por mes en invierno y dos veces en verano, para monitorear la eficiencia de remoción del lecho filtrante. Es importante realizar análisis turbiedad en el efluente, al menos 2 veces al mes, para monitorear su comportamiento en los primeros meses de operación, la turbiedad es un buen indicador de la eficiencia de remoción del complejo hierro-arsénico del filtro. Esta información puede ser muy útil para determinar el período de reemplazo de los clavos, manejo de lodos y la limpieza de la arena. En el agua de pozo a tratar es importante conocer la concentración de fosfatos, ya que concentraciones altas compiten fuertemente con el arsénico por el hierro.
8. Finalmente, es importante que para proyecto de mitigación de arsénico con el filtro KANCHAN se desarrollen paralelo programas de capacitación y seguimiento a las familias donde se implemente el filtro. La UNI puede establecer un nivel de cooperación con el MINSA y OPS, aprovechando la experiencias de estas dos instituciones en el tema, u otros organismos vinculado a la salud pública, para que

se logre llevar a cabo un programa de mitigación de arsénico en las aéreas afectadas del país que involucre componentes de investigación, dotación de equipos de laboratorio para el monitoreo de la calidad del agua, dotación de los filtros a las familias afectadas, capacitación y seguimiento a la operación de los filtros KANCHAN o cualquier otra tecnología a nivel familiar. Las lecciones aprendidas según CAWST, 2008, durante la aplicación del filtro BIOSAND, considerado antecesor del filtro KANCHAN, en Nicaragua para la remoción de coliforme fecal determinaron que la carencia de conciencia, educación y entrenamiento contribuyó al pobre mantenimiento y operación, así como la re-contaminación del agua filtrada. Los usuarios necesitan visitas de seguimiento continuamente. En muchas partes del mundo la alta remoción de arsénico y sostenibilidad de una tecnología está a menudo vinculado a la aceptación de la tecnología por parte de los usuarios (Samnang y colaboradores, 2008).

VI. BIBLIOGRAFIA.

- 1 Análisis arsénico en aguas de consumo y su remoción. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com.ar>. Año de consulta: 2008.
- 2 Bangladesh Centre for Advanced Studies. Arsenic special issue. BCAS, Newsletter, 8(1): 1-8, Jan.-Mar. 1997.
- 3 Barragne-Bigot P. Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente con arsénico en Nicaragua. UNICEF, 2004.
- 4 Campos V. Estudio de un método alternativo para la purificación de arsénico en el agua. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 2003.
- 5 Castro-Larios T. Procedimientos normalizados de operación de para la determinación de arsénico total por generación de hidruros con Arsenator. Laboratorios ambientales, CIEMA-UNI, 2009.
- 6 CAWST (*Centre for Affordable, Water and Sanitation Technology*). Sumario de las pruebas de laboratorio y de campo para el filtro BIOSAND. 2008.
- 7 CEPIS. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Serie Técnica. 1981.
- 8 Chea S., Mao S., Uy D., Ngai T. K. K. y Mahin T. KANCHAN Arsenic Filter: Evaluation of Aplicability to Cambodia. Phase I Technical Report, September, 2008.
- 9 Environmental Health Directorate of Health Canada. Arsenic guidelines for Canadian drinking quality. Ottawa, 1992, p. 1-9.
- 10 EPA, 2000. Research plan for arsenic in drinking water. Análisis: Arsénico en aguas de consumo y su remoción. Disponible en <http://www.estrucplan.com.ar>. Año de consulta 2008.

- 11 Esparza M. L. y Medina M. W. Abatimiento de arsénico en aguas subterráneas para zonas rurales. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 1998.
- 12 Frederick, P.; Kenneth, B.; Chien-Jen, C. Health implications of arsenic in drinking water. *Journal AWWA*, 86(9):52-63, Sep. 1994.
- 13 Gómez C., Alina. Monitoreo y atención de intoxicados con arsénico en el Zapote, Municipio de San Isidro, departamento de Matagalpa, Nicaragua 1994-2002.
- 14 Hussam A. y Munir A.K. Un simple y efectivo filtro para remover arsénico basado en una matriz de compuesto de férrico: Desarrollado y validado en aguas subterráneas de Bangladesh. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, (2007) **42**, 1869–1878.
- 15 Jain C. K. y Ali I. Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. *Water Research*. 2000.
- 16 Kosmos W. The evaluation of the arsenator. Department of Analytical Chemistry, Graz University, Austria. Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>. Año de consulta: 2008.
- 17 Lillo J. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Madrid), España. 2005.
- 18 M. L. Castro de Esparza. Presencia de arsénico en el agua de bebida en America Latina y su efecto en la salud pública. International congress, natural arsenic in groundwaters of America Latina, Mexico 2006.
- 19 Mohan D. and Pittman Ch. U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. Department of Chemistry, Mississippi State University, Mississippi State, MS 39762, USA. Environmental Chemistry Division,

- Industrial Toxicology Research Centre, Post Box No. 80, Mahatma Gandhi Marg, Lucknow 226001, India. 2007
- 20 Mortimer Ch. E. QUIMICA, Capitulo XVIII, página 490. Grupo Editorial Iberoamérica. 1990.
- 21 Ngai T. y Walewijk S. The Arsenic Biosand Filter (ABF) Project: Design of an Appropriate Household Drinking Water Filter for Rural Nepal. Rural Water Supply and Sanitation Support Programme (RWSSP), Butwal, Nepal and Environment and Public Health Organization (ENPHO), Kathmandu, Nepal. 2003.
- 22 Ngai T., Dangol B. y Murcott, S. Construction, Installation, Operation, and Troubleshooting of KANCHANTM Arsenic Filter KAF) Gem505 Version. 2006.
- 23 Ngai T., Dangol B., Murcott, S. y Shrestha, R.R. KANCHAN Arsenic Filter. Massachusetts Institute of Technology (MIT) and Environment and Public Health Organization (ENPHO). Kathmandu, Nepal. 2006.
- 24 Odell N. Performance Evaluation of the Arsenic Biosand Filter for Mitigation of Arsenic Contamination. US Peace Corps volunteer - Parasi, Nepal. 2004. Disponible en http://web.mit.edu/watsan/worldbank_summary.htm. Año de consulta: 2008.
- 25 OMS. Punto 5,4 del orden del día provisional. Mitigación de los efectos del arsénico presente en las aguas subterráneas. Informe de la Secretaría. 2006.
- 26 Pérez-Parra J. A. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1986.
- 27 Romero-Rojas J. A.. Potabilización del Agua. 3ª edición, Editorial Alfaomega; México. 1999.
- 28 Shrestha P. K. Arsenic, iron and coliforms removal efficiency of household level. In partial fulfilment of the requirement for the degree of Master of Science in environmental engineering Biosand filter. Lalitpur, Nepal. 2004.

- 29 Shrestha R.R., Maskey A. y Dahal B.M. An Overview of Arsenic Contamination and its Mitigation in Nepal Red Cross Society Areas. Drinking Water Quality Improvement Program (DWQIP), Kathmandu, Nepal. 2003.
- 30 Simeonova V. P., Rivera-Huerta M. L., Piña-Soberanis M., Avilés-Flores M. y Pérez-Castrejón S. Evaluación de diversos minerales para la remoción de arsénico de agua para consumo humano. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006.
- 31 Smedley P.L. y Kinniburgh D.G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry. 2002.
- 32 Swash P., Myanmar P. S. Field Evaluation of the Wagtech Arsenator. Royal School of Mines, Imperial College, London, UK, 2003. Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>. Año de consulta: 2008.
- 33 The National Academy of Sciences. Arsenic in drinking water. National Academy Press, Washington, 1999. <http://books.nap.edu/books/0309063337/html/1.html>
- 34 The Wagtech Arsenator® system is the lowest cost, most portable and accurate method for determining Arsenic in safe limits (WHO guide-lines 10 ppb/ μ g/l). Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>. Año de consulta: 2008.
- 35 Torres S. E. Remoción del arsénico del agua a nivel familiar. Estudio de caso: Argentina. Universidad de Chile. 2006.
- 36 Van Dijk, J.C.; Oomen, J. Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo. IRC/OMS/CEPIS. Serie Documentos Técnicos No. 11 (1978).
- 37 Vu K. B., Kaminski M. D. y Nuñez L. Review of Arsenic Removal Technologies for Contaminated Groundwaters. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439 operated by The University of Chicago for the United States Department of Energy under Contract W-31-109-Eng-38. 2002.

VII. ANEXOS.

Anexo 1. Tablas Complementarias.

Tabla 32. Costos de construcción de filtro KANCHAN y SONO filter modificado.

Concepto	Unidad de medida	Cantidad	Costos	
			unitario (c\$)	total (c\$)
Filtro Kanchan				424
Balde Plástico (45 lts)	Unid	1	80	80,00
Pana plástica (10 lts)	Unid	1	25	25,00
Clavos de hierro < 20 mm	kg	5	41,8	209,00
Arena Fina < 1 mm	Lt	16	1,5	24,00
Arena Media (3 a 6 mm)	Lt	4	1,5	6,00
Grava (6 a 15 mm)	Lt	6	1,5	9,00
Trozos ladrillos de barro (5 a 10 cm)	kg	2,5	2	5,00
Tubo PVC de 1/2" - SDR -13,5	M	1	25	25,00
Tapón PVC 1/2"	un	1	5	5,00
Adaptador macho de rosca 1/2" PVC	un	1	5	5,00
Empaques de Hule 1/2"	un	2	2	4,00
Codos de 90° - PVC 1/2" (Extremo liso y roscado)	un	1	5	5,00
Codos de 90° - PVC 1/2" (Extremos lisos)	un	2	5	10,00
Teflón	un	1	10	10,00
Pegamento PVC (1/8 gln)	gln	0,13	15	1,88
Sono filter modificado				654
Recipiente - #1 (30 lts)				425
Balde Plástico (30 lts)	un	1	95	95
Pana Plástica (10 lts)	un	1	25	25
Clavos de hierro < 20 mm	kg	5	41,8	209
Arena Media (3 a 6 mm)	Lt	10	1,5	15
Trozos ladrillos de barro (5 a 10 cm)	kg	1	2	2
Llave de chorro de 1/2" PVC	un	1	40	40
Empaques de Hule 1/2"	un	2	2	4
Manguera plástica flexible de 1/2"	M	1	15	15

Autor: Ariel Aragón González.

Concepto	Unidad de medida	Cantidad	Costos	
			unitario (c\$)	total (c\$)
Terminal para mangueras	un	1	20	20
Recipiente - #2 (25 lts)				229
Balde Plástico (25 lts)	un	1	70	70
Arena Fina < 1 mm	Lt	5	1,5	8
Arena Media (3 a 6 mm)	Lt	5	1,5	8
Trozos ladrillos de barro (5 a 10 cm)	kg	1	2	2
Carbón de leña	kg	2	15	30
Adaptador macho de rosca 1/2" PVC	un	2	5	10
Llave de chorro de 1/2" PVC	un	2	40	80
Rosca de 1/2" PVC	un	1	2	2
Empaques de Hule 1/2"	un	4	2	8
Teflón	un	1	10	10,00
Pegamento PVC (1/8 gln)	gln	0,13	15	1,88

Tabla 33. Correlación de datos.

SONO filter modificado	Volumen acumulado de agua filtrada	Tiempo de filtración	pH entrada	CE entrada	P.redox entrada	Temperatura entrada	Turbiedad salida
Arsénico removido	0,184	0,235	0,017	0,195	-0,133	-0,394	0,139
			pH salida	CE salida	P.redox salida	Temperatura salida	
Volumen acumulado de agua filtrada		0,506	0,151	-0,024	-0,067	-0,762	-0,649
Tiempo de filtración			-0,052	-0,209	-0,187	-0,423	-0,317

Filtro KANCHAN 1er ciclo	Volumen acumulado de agua filtrada	Tiempo de filtración	pH entrada	CE entrada	P.redox entrada	Temperatura entrada	Turbiedad salida
Arsénico removido	0,464	0,304	-0,004	0,335	0,130	-0,674	-0,642
			pH salida	CE salida	P.redox salida	Temperatura salida	
Volumen acumulado de agua filtrada		0,257	0,219	0,085	-0,069	-0,482	-0,858
Tiempo de filtración			0,287	0,065	-0,030	-0,325	-0,408

Filtro KANCHAN 2do ciclo	Volumen acumulado de agua filtrada	Tiempo de filtración	pH entrada	CE entrada	P.redox entrada	Temperatura entrada	Turbiedad salida
Arsénico removido	-0,238	0,439	-0,305	0,734	0,236	-0,484	-0,472
			pH salida	CE salida	P.redox salida	Temperatura salida	
Volumen acumulado de agua filtrada		-0,541	0,136	-0,526	0,127	0,194	-0,358
Tiempo de filtración			0,294	0,523	0,243	0,502	-0,546

Filtro KANCHAN 3er ciclo	Volumen acumulado de agua filtrada	Tiempo de filtración	pH entrada	CE entrada	P.redox entrada	Temperatura entrada	Turbiedad salida
Arsénico removido	-0,238	0,441	-0,305	0,734	0,236	-0,484	0,605
			pH salida	CE salida	P.redox salida	Temperatura salida	
Volumen acumulado de agua filtrada		-0,633	0,009	-0,571	0,338	0,364	-0,143
Tiempo de filtración			0,166	0,600	-0,111	0,136	0,494

Tabla 34. Remoción de arsénico y filtración de agua por SONO filter modificado.

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua de entrada (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
1	10	10	81	29	52	64,2 %	38	15,83
2	10	20	81	37	44	54,3 %	40	15,00
3	10	30	81	45	36	44,4 %	37	16,22
4	10	40	81	49	32	39,5 %	37	16,22
5	10	50	80	43	37	46,3 %	40	15,00
6	10	60	80	42	38	47,5 %	42	14,25
7	10	70	80	36	44	55,0 %	42	14,29
8	10	80	80	36	44	55,0 %	42	14,29
9	10	90	82	32	50	61,0 %	37	16,22
10	10	100	82	32	50	61,0 %	41	14,55
11	10	110	82	34	48	58,5 %	49	12,31
12	10	120	82	54	28	34,1 %	32	18,75
13	10	130	82	41	41	50,0 %	43	14,12
14	10	140	83	42	41	49,4 %	39	15,48
15	10	150	83	43	40	48,2 %	51	11,74
16	10	160	83	47	36	43,4 %	41	14,55
17	10	170	83	45	38	45,8 %	41	14,55
18	10	180	83	42	41	49,4 %	39	15,43
19	10	190	86	33	53	61,6 %	41	14,59

Autor: Ariel Aragón González.

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua de entrada (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
20	10	200	86	42	44	51,2 %	41	14,59
21	10	210	86	36	50	58,1 %	40	15,00
22	10	220	86	43	43	50,0 %	39	15,38
23	10	230	86	38	48	55,8 %	39	15,48
24	10	240	86	45	41	47,7 %	42	14,21
25	10	250	86	39	47	54,7 %	44	13,71
26	10	260	86	35	51	59,3 %	48	12,63
27	10	270	82	40	42	51,2 %	41	14,59
28	10	280	82	40	42	51,2 %	51	11,71
29	10	290	82	43	39	47,6 %	44	13,50
30	10	300	82	45	37	45,1 %	50	12,00
31	10	310	82	45	37	45,1 %	42	14,21
32	10	320	89	28	61	68,5 %	46	12,97
33	10	330	89	40	49	55,1 %	43	13,85
34	10	340	89	47	42	47,2 %	41	14,63
35	10	350	89	47	42	47,2 %	44	13,50
36	10	360	89	45	44	49,4 %	51	11,71

Tabla 35. Parámetros de calidad de agua filtrada con SONO filter modificado.

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (mV)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	7,32	7,89	863	1081	0,111	15,3	26,6	26,1	394	451
2	7,36	7,98	867	1147					400	512
3	7,25	7,84	873	1157					406	507
4	7,24	7,73	877	1016			26,2	25,7	400	460
5	7,30	7,87	901	1119	0,098	5,35	27,4	26,9	377	434
6	7,29	8,25	905	1185					383	495
7	7,28	7,98	867	973					389	490
8	7,35	7,77	863	905			26,4	25,9	383	443
9	7,57	7,91	885	995	0,102	4,78	26,4	26,8	373	533
10	7,38	7,74	883	1091					379	436
11	7,47	7,83	882	1111					385	497
12	7,45	8,04	874	1158					391	492

Autor: Ariel Aragón González.

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (mV)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
13	7,66	8,15	870	1009			26,3	26,3	387	447
14	7,4	8,00	890	1000	0,109	6,97	27,1	26,6	375	535
15	7,49	7,78	889	1107					381	438
16	7,61	7,79	885	1165					387	499
17	7,39	7,80	879	1163					393	494
18	7,49	7,89	875	1014			25,2	25	390	450
19	7,13	7,84	876	1094	0,059	3,51	24,8	24,3	388	445
20	7,41	8,03	888	1237					388	500
21	7,22	7,81	894	1178					387	488
22	7,55	8,22	898	1220			25,2	24,7	385	445
23	7,30	8,03	893	1269	0,073	2,44	25,0	24,5	377	496
24	7,31	7,99	889	1232					383	511
25	7,29	7,98	883	1258					389	501
26	7,28	7,77	885	1024			24,9	24,4	386	446
27	7,33	7,93	865	975	0,068	3,6	28,3	24,6	318	478
28	7,36	7,99	869	1110					396	459
29	7,28	8,11	869	1067					402	498
30	7,50	8,00	875	1068					408	497
31	7,53	8,02	879	1060			25,2	24,7	405	465
32	7,77	8,37	909	1019	0,046	5,82	24,8	24,9	373	533
33	7,22	7,84	887	932	0,045	2,56	25,1	24,6	429	416
34	7,32	7,94	898	1178					385	486
35	7,20	7,79	892	1176					391	451
36	7,15	7,78	873	883			24,4	24,9	440	453

Tabla 36. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Primer Ciclo).

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua cruda (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
1	10	10	81	5	76	93,8 %	46	13,04
2	10	20	81	4	77	95,1 %	48	12,63
3	10	30	81	6	75	92,6 %	49	12,24
4	10	40	81	5	76	93,8 %	51	11,76
5	10	50	80	10	70	87,5 %	52	11,54

Autor: Ariel Aragón González.

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua cruda (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
6	10	60	80	6	74	92,5 %	51	11,76
7	10	70	80	6	74	92,5 %	50	12,00
8	10	80	80	6	74	92,5 %	48	12,50
9	10	90	82	3	79	96,3 %	49	12,24
10	10	100	82	mld	80	97,6 %	52	11,54
11	10	110	82	mld	80	97,6 %	49	12,24
12	10	120	82	mld	80	97,6 %	48	12,50
13	10	130	82	mld	80	97,6 %	51	11,76
14	10	140	83	4	79	95,2 %	47	12,77
15	10	150	83	mld	81	97,6 %	49	12,24
16	10	160	83	mld	81	97,6 %	52	11,54
17	10	170	83	mld	81	97,6 %	51	11,76
18	10	180	83	mld	81	97,6 %	48	12,50
19	10	190	86	mld	84	97,7 %	48	12,50
20	10	200	86	mld	84	97,7 %	47	12,77
21	10	210	86	mld	84	97,7 %	52	11,54
22	10	220	86	mld	84	97,7 %	52	11,54
23	10	230	86	mld	84	97,7 %	51	11,76
24	10	240	86	mld	84	97,7 %	50	12,00
25	10	250	86	mld	84	97,7 %	50	12,00
26	10	260	86	mld	84	97,7 %	52	11,54
27	10	270	82	mld	80	97,6 %	51	11,76
28	10	280	82	mld	80	97,6 %	55	10,91
29	10	290	82	3	79	96,3 %	101	5,93
30	10	300	82	mld	80	97,6 %	115	5,22
31	10	310	82	mld	80	97,6 %	110	5,45
32	10	320	89	mld	87	97,8 %	104	5,77
33	10	330	89	mld	87	97,8 %	112	5,36
34	10	340	89	mld	87	97,8 %	115	5,22
35	10	350	89	mld	87	97,8 %	48	12,50
36	10	360	89	mld	87	97,8 %	48	12,50
37	10	370	81	mld	79	97,5 %	43	13,95
38	10	380	81	mld	79	97,5 %	44	13,64

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua cruda (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
39	10	390	81	mld	79	97,5 %	48	12,50
40	10	400	81	4	77	95,1 %	55	10,91
41	10	410	82	mld	80	97,6 %	53	11,32
42	10	420	82	mld	80	97,6 %	50	12,00
43	10	430	82	mld	80	97,6 %	46	13,04
44	10	440	82	3	79	96,3 %	51	11,76
45	10	450	82	mld	80	97,6 %	51	11,76

mld: Menor que el límite de detección del equipo Arsenator.

Tabla 37. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua cruda (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
1	20	20	82	mld	80	97,6 %	91	13,19
2	20	40	82	mld	80	97,6 %	95	12,63
3	20	60	82	mld	80	97,6 %	203	5,91
4	20	80	82	mld	80	97,6 %	250	4,80
5	20	100	82	mld	80	97,6 %	252	4,76
6	20	120	89	mld	87	97,8 %	249	4,82
7	20	140	89	mld	87	97,8 %	247	4,86
8	20	160	89	mld	87	97,8 %	271	4,43
9	20	180	89	mld	87	97,8 %	91	13,19
10	20	200	89	mld	87	97,8 %	91	13,19
11	20	220	81	mld	79	97,5 %	93	12,90
12	20	240	81	mld	79	97,5 %	85	14,12
13	20	260	81	mld	79	97,5 %	91	13,19
14	20	280	81	mld	79	97,5 %	90	13,33
15	20	300	82	mld	80	97,6 %	88	13,64
16	20	320	82	mld	80	97,6 %	91	13,19
17	20	340	82	mld	80	97,6 %	93	12,90
18	20	360	82	mld	80	97,6 %	89	13,48

Autor: Ariel Aragón González.

19	20	380	82	mld	80	97,6 %	86	13,95
----	----	-----	----	-----	----	--------	----	-------

mld: Menor que el límite de detección del equipo Arsenator.

Tabla 38. Remoción de arsénico y filtración de agua por filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).

Día	Volumen filtrado (Lt)	Volumen acumulado (Lt)	Concentración de arsénico en el agua cruda (µg/L)	Concentración de arsénico en el agua filtrada (µg/L)	Remoción de arsénico (µg/L)	Porcentaje de remoción de arsénico	Duración del filtrado (min)	Tasa de filtración (L/h)
1	30	30	82	mld	80	97,6 %	145	12,41
2	30	60	82	mld	80	97,6 %	142	12,68
3	30	90	82	mld	80	97,6 %	322	5,59
4	30	120	82	mld	80	97,6 %	396	4,55
5	30	150	82	mld	80	97,6 %	360	5,00
6	30	180	89	mld	87	97,8 %	395	4,56
7	30	210	89	mld	87	97,8 %	391	4,60
8	30	240	89	mld	87	97,8 %	408	4,41
9	30	270	89	mld	87	97,8 %	138	13,04
10	30	300	89	mld	87	97,8 %	145	12,41
11	30	330	81	mld	79	97,5 %	137	13,14
12	30	360	81	mld	79	97,5 %	142	12,68
13	30	390	81	mld	79	97,5 %	136	13,24
14	30	420	81	mld	79	97,5 %	137	13,14
15	30	450	82	mld	80	97,6 %	131	13,74
16	30	480	82	mld	80	97,6 %	139	12,95
17	30	510	82	mld	80	97,6 %	139	12,95
18	30	540	82	mld	80	97,6 %	149	12,08
19	30	570	82	mld	80	97,6 %	148	12,16

mld: Menor que el límite de detección del equipo Arsenator.

Tabla 39. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Primer ciclo).

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (mV)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	7,32	7,62	863	1013	0,111	0,098	26,6	26,1	394	467
2	7,36	7,66	867	1034					400	508
3	7,25	7,55	873	1058					406	507
4	7,24	7,54	877	988			26,2	25,7	400	470

Autor: Ariel Aragón González.

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (mV)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
5	7,30	7,70	901	1071	0,098	0,085	27,4	26,9	377	455
6	7,29	7,68	905	1089					383	496
7	7,28	7,46	867	805					389	495
8	7,35	7,48	863	822			26,4	25,9	383	458
9	7,30	7,64	885	1051	0,102	0,089	26,4	26,8	373	452
10	7,03	7,39	883	881					379	462
11	7,04	7,40	882	917					385	503
12	7,45	7,85	874	1052					391	502
13	7,66	7,96	870	994			26,3	26,3	387	467
14	7,4	7,80	890	1043	0,109	0,096	27,1	26,6	375	454
15	7,49	7,69	889	1039					381	464
16	7,61	7,74	885	1052					387	505
17	7,39	7,59	879	1064					393	504
18	7,49	7,68	875	986			25,2	25	390	470
19	7,13	7,52	876	881	0,059	0,039	24,8	24,3	388	461
20	7,41	7,92	888	1172					388	496
21	7,22	7,62	894	1110					387	488
22	7,55	7,65	898	1169			25,2	24,7	385	455
23	7,30	7,83	893	1174	0,073	0,06	25,0	24,5	377	494
24	7,31	7,72	889	1124					383	507
25	7,29	7,66	883	1146					389	498
26	7,28	7,58	885	886			24,9	24,4	386	456
27	7,33	7,38	865	871	0,068	0,055	28,3	24,6	318	402
28	7,36	7,71	869	1085					396	460
29	7,28	7,98	869	1033					402	499
30	7,50	7,94	875	1034					408	506
31	7,53	7,63	879	990			25,2	24,7	405	490
32	7,77	7,92	909	1062	0,046	0,033	24,8	24,9	373	453
33	7,22	7,81	887	1013			25,1	24,6	429	406
34	7,32	7,47	898	1065					385	503
35	7,20	7,45	892	1077					391	502
36	7,15	7,56	873	806			24,4	24,9	440	445
37	7,52	7,77	867	1017	0,049	0,036	26,4	26,7	387	460
38	7,40	7,65	871	1038					393	501
39	7,41	7,66	877	1062					399	500
40	7,54	7,79	881	992			26,3	26,4	395	465

Autor: Ariel Aragón González.

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (mV)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
41	7,44	7,74	861	1014	0,035	0,044	24,8	24,6	385	454
42	7,37	7,67	862	1012					391	464
43	7,39	7,69	866	1033					397	505
44	7,48	7,78	872	1057					393	494
45	7,37	7,67	876	987			24,4	24,4	401	471

Tabla 40. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Segundo ciclo).

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (Eh)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	7,33	7,47	865	888	0,05	0,06	28,30	24,53	318	402
2	7,36	7,78	869	1085	0,06	0,07			396	459
3	7,28	8,06	869	1052					402	500
4	7,50	7,92	875	1025					408	513
5	7,53	7,87	879	903			25,40	24,90	405	467
6	7,77	7,91	909	934	0,05	0,04	24,77	25,00	373	457
7	7,22	7,78	887	1062	0,04	0,04			429	602
8	7,32	7,89	898	919					385	471
9	7,20	7,90	892	916					391	475
10	7,15	7,54	873	817			24,40	24,40	440	445
11	7,52	7,95	867	795	0,04	0,05	26,40	24,77	387	555
12	7,40	7,63	871	681	0,04	0,04			393	475
13	7,41	7,83	877	809					399	479
14	7,54	7,97	881	780			26,30	24,47	395	453
15	7,44	7,58	861	884	0,05	0,06	24,77	24,93	385	469
16	7,37	7,77	862	887	0,05	0,05			391	564
17	7,39	7,96	866	889					397	483
18	7,48	8,08	872	893					393	477
19	7,37	7,81	876	899			24,40	24,97	401	463

Tabla 41. Parámetros de calidad de agua en agua filtrada con filtro KANCHAN (Tercer ciclo).

Día	pH		Conductividad (ms/cm)		Turbiedad (NTU)		Temperatura (°C)		Potencial redox (Eh)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
27	7,33	7,68	865	870	0,040	0,042	28,30	24,5	318	389
28	7,36	7,84	869	1080	0,053	0,055			396	453
29	7,28	8,01	869	1012	0,036	0,038			402	502
30	7,50	7,85	875	912					408	519
31	7,53	7,88	879	886			25,40	25	405	480
32	7,77	7,92	909	912	0,049	0,083	24,77	24,6	373	445
33	7,22	7,68	887	895	0,035	0,042			429	401
34	7,32	7,90	898	886					385	485
35	7,20	7,91	892	900					391	480
36	7,15	7,60	873	824			24,40	24,4	440	441
37	7,52	7,73	867	797	0,035	0,037	26,40	24,7	387	552
38	7,40	7,90	871	821	0,036	0,038			393	482
39	7,41	8,02	877	802					399	476
40	7,54	7,92	881	762			26,30	24,4	395	458
41	7,44	7,85	861	859	0,044	0,046	24,77	25,0	385	457
42	7,37	7,78	862	865	0,047	0,049			391	567
43	7,39	7,80	866	854					397	497
44	7,48	7,89	872	875					393	482
45	7,37	7,78	876	878			24,40	25,0	401	476

127



CIEMA

C:\RESAT\PROYECTO /		DIRECCIÓN: Coto, Municipio, Comunidad, Departamento, E-Mail			TELÉFONO
Proyecto Arsenico		Comunidad Linda Vista, Santa Rosa del Peñon, Mina La India			
ATENCIÓN		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Comunidad, Departamento, E-Mail			TELÉFONO
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO		FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS		PROFORMA	NÚMERO DE MUESTRAS
INGRESO		FINAL DE ANALISIS		NÚMERO	tres (3)
09/12/2008		12/12/2008		08/01/2009	
TIPO DE MUESTRA				SUPERVISIÓN DE MUESTREO EN CAMPO	
Agua Subterránea					

Fecha de Muestreo		05/12/2008, 12:00 m	05/12/2008, 11:18 a.m.	06/12/2008, 01:18 p.m.	Valor
Muestreado por		Ing. Rolando Castillo	Ing. Grela Muñoz	Ing. Aniel Aragón	
Fuente		Pozo Público	Pozo Privado	Pozo Privado	
Codificación Cliente		Frasco Verde	Frasco Rojo	Frasco Amarillo	
Observaciones de Ubicación		Linda Vista, León	Santa Rosa del Peñon, León	Mina La India, León	Permisible
Codificación CIEMA		1A-01-281	1A-01-282	1A-01-283	

METODO SIM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad **	VALOR DE CONCENTRACION			NORMA #
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra3	
Visual	Aspecto	*	Clara	Clara	Clara	NE
4500-B	Potencial de Hidrógeno	pH	7.69	6.89	7.20	6.5 - 8.5
2510-B	Conductividad Eléctrica	µS/cm	2040.00	623.00	891.00	400
2130-B	Turbiedad	NTU	0.04	0.08	0.05	5
2120-C	Color Verdadero	UC	<1.0	<1.0	<1.0	15
2320-B	Alcalinidad	mg/l	157.40	222.00	355.40	NE
2320-B	Carbonatos	mg/l	0.00	0.00	0.00	NE
2320-B	Bicarbonatos	mg/l	157.40	222.00	355.40	NE
4500-D	Nitratos	mg/l	0.42	11.10	6.67	50
4500-B	Nitritos	mg/l	<0.009	<0.009	<0.009	0.1
4500-D	Cloruros	mg/l	15.40	36.20	61.20	250
3500-B	Pierro Total	mg/l	0.143	0.106	0.050	0.3
4500-D	Sulfatos	mg/l	968.00	34.40	49.00	250
2340-C	Dureza total	mg/l	237.76	239.68	331.12	400
2340-C	Dureza Calcica	mg/l	234.16	181.20	253.76	NE
3500-B	Calcio	mg/l	93.85	72.63	102.00	100
3500-B	Magnesio	mg/l	0.87	19.21	18.80	50
3500-B	Manganeso	mg/l	0.02	<0.02	<0.02	0.5
3500-C	Sodio	mg/l	432.00	12.00	50.00	200
3500-C	Potasio	mg/l	1.77	2.15	2.27	10
4500-C	Fluor	mg/l	1.27	0.24	0.24	0.7
2540-B	Sólidos Totales	mg/l	1520.00	493.00	630.00	NE
2540-C	Sólidos Totales Disueltos	mg/l	1487.00	431.00	616.00	1000
4500-C	Fósforo Total	mg/l	0.10	0.20	0.30	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva


5 = menor al límite de detección que se especifica por parámetro. NE = No especificada por la Norma. NR = No Reporta

Metodos Internacionales empleados: SM = Standard Methods, 20th: 1998. EPA = Environmental Protection Agency.

Valor Límite Permisible en la Norma CAPRE

Dr. Francisco Antonio Rarrin
Resp. Lab. F.Q. Aguas Naturales




Msc. Roberto Davila
Técnico Laboratorios Ambientales

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad e imparcialidad del informe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
LABORATORIO AMBIENTAL



CERTIFICADO DE ANALISIS

FQAN-174

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELÉFONO	
NICARAGUA SUGAR ESTATES LIMITED		CHICHIGALPA, CHINANDEGA		23431013	
ATENCIÓN:		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento; E-Mail		TELÉFONO	
Ing. Ivette Reyes Flores				2278-3930	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO					
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS	CADENA DE CUSTODIA	NÚMERO DE MUESTRAS
09/10/2009	12/10/2009	12/10/2009	15/10/2009	67	dos (2)
TIPO DE MUESTRA			SUPERVISOR DE MUESTREO EN CAMPO		
Agua Subterránea			Ing. Rolando B. Castillo		
Fecha de Muestreo		9/10/2009, 12:30 m		9/10/2009, 1:20 p.m	
Muestreado por		Ing. Rolando Castillo		Ing. Rolando Castillo	
Fuente		Comunidad Linda vista Santa Rosa del Peñon		Comunidad Mina la India Santa Rosa del Peñon	
Codificación Cliente		FQ-09-204		FQ-09-205	
Observaciones de Ubicación		León		León	
Codificación CIEMA		LA-0910-160		LA-0910-161	
METODO	ENSAYO REALIZADO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		NORMA
SM // EPA	PARAMETRO	**	Muestra 1	Muestra 2	#
Visual	Aspecto	*	Clara	Turbia	
3500-B	Hierro Total	mg/l	0,050	0,078	0,3
4500-E	Fósforo Total	mg/l	0,080	0,270	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

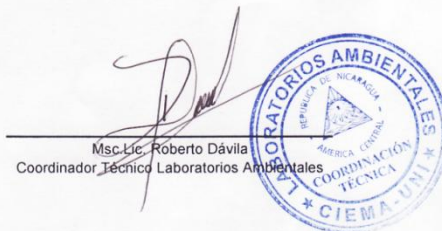
< = menor al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE = No especificada por la Norma NR = No Reporta

Metodos Internacionales empleados: SM = Standard Methods, 20th.1998 EPA = Environmental Protection Agency

Valor Limite Permissible en la Norma: CAPRE



Lic. Francisco Antonio Ramirez
Resp. Lab. F-Q Aguas Naturales



Msc. Lic. Roberto Dávila
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad e imparcialidad del informe.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
LABORATORIO AMBIENTAL



CERTIFICADO DE ANALISIS

EMPRESA / PROYECTO /		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento		TELÉFONO	
Proyecto Arsénico					
ATENCIÓN:		DIRECCIÓN: Calle, Municipio; Comunidad; Departamento; E-Mail		TELÉFONO	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO		FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS		PROFORMA	
INGRESO:	INICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	13/03/2009	NUMERO	NUMERO DE MUESTRAS tre (3)
22/01/2009	23/01/2009	23/01/2009			
TIPO DE MUESTRA			SUPERVISOR DE MUESTREO EN CAMPO		
Agua Filtrada					

Fecha de Muestreo		22/01/2009		Valor	
Muestreado por		Lic. Francisco A. Ramirez		Limite	
Fuente		Grifos y Tanque		Permisible	
Codificación Cliente		NR		NORMA	
Observaciones de Ubicación		80 mts. Al este Astro Cartón		#	
Codificación CIEMA		LA-0901-02			
METODO	ENSAYO REALIZADO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		
SM // EPA	PARAMETRO	**	Muestras		
3500-B	Hierro Total (Rolando)	mg/l	0,041		0,3
3500-B	Hierro Total (Ariel)	mg/l	0,143		0,3
3500-B	Hierro Total (Grela)	mg/l	0,373		0,3

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.
 < = menor al Limite de Detección que se especifica por parámetro NE = No especificada por la Norma NR = No Reporta
 Metodos Internacionales empleados: SM = Standard Methodos, 20th.1998 EPA = Environmental Protection Agency
 # Valor Limite Permisible en la Norma: CAPRE


 Lic. Francisco Antonio Roldán
 Resp. Lab. F-Q. Aguas Naturales


 Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad e imparcialidad del informe.

Autor: Ariel Aragón González.

Anexo 3. Resultado de laboratorio de muestra de arena.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
LABORATORIO DE MATERIALES Y SUELOS
"ING. JULIO PADILLA M."**



Managua, 3 de Diciembre de 2009

**INGENIERO
ROLANDO BENITO CASTILLO
Su Oficina**

Estimado Ing. Castillo:

Adjunto a la presente le estoy haciendo entrega de resultados de laboratorio de una muestra de arena de cauce, procedente de Momotombo, municipio de La Paz Centro, departamento de León.

Cabe mencionar que a la muestra suministrada, se le realizaron los ensayos siguientes, cuyos resultados se presentan en hoja adjunta:

- Gravedad específica.
- Absorción.
- Granulometría.

También se presentan los resultados de porosidad, curva granulométrica contiendo D60, D30 y D10, así como los coeficientes de uniformidad (Cu) y de Curvatura (Cc).

Esperando que el presente informe satisfaga los requerimientos de su empresa, me despido.

Atentamente.



**Ing. Marvin Blanco Rodríguez
Responsable
Laboratorio de Materiales y Suelos - UNI**

c.c.: Archivo.

Elaborado por: Ing. Marvin Blanco Rodríguez Responsable Lab. Mat. y Suelos-UNI
Teléfono Celular: 888 72 675

RESULTADOS DE LABORATORIO

MATERIAL ENSAYADO: ARENA DE CAUCE

PROCEDENCIA: "Momotombo, La Paz Centro"

ANALISIS GRANULOMETRICO

Tamiz N°	% Que Pasa
N°16	100
N°30	74
N°50	14
N°100	3
N°200	0

Módulo de Finura : 2.11

Gravedad Específica: 2.61

% Absorción : 2.81 %

Porosidad (n) : 0.068 = 6.8%

Relación de Vacíos (e) : 0.073

Diámetro Efectivo : 0.23 mm

Coefficiente de Uniformidad : 2.22

Coefficiente de Curvatura : 1.54



Elaborado por: Ing. Marvin Blanco Rodríguez

Responsable Lab. Mat. y Suelos-UNI

Teléfono Celular: 888 72 675

Autor: Ariel Aragón González.



Anexo 4. Galería de Fotos.



Foto 1. Filtro KANCHAN utilizado en la investigación, ubicado en CIEMA-UNI.



Foto 2. SONO filter modificado utilizado en la investigación, ubicado en CIEMA-UNI.

Autor: Ariel Aragón González.



Foto 3. Clavos Oxidados utilizados en filtros KANCHAN y SONO filter.



**Foto 4. Recolección de agua contaminada con arsénico en pozo seleccionado.
Comunidad Mina La India.**

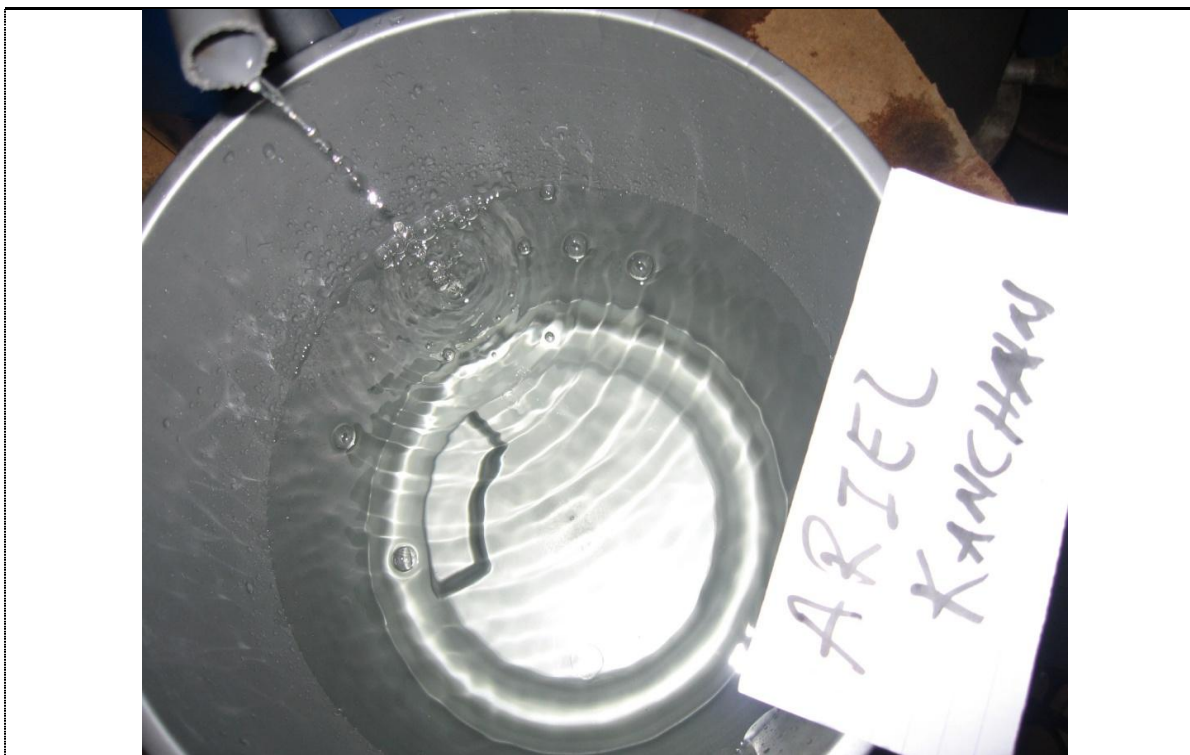


Foto 5. Agua filtrada con filtro KANCHAN utilizado en la investigación.



Foto 6. Agua filtrada con SONO filter modificado utilizado en la investigación.



Foto 7. Lodo acumulado en fondo de pana del filtro KANCHA.



**Foto 8. Hierro y complejo hierro-arsénico acumulado en superficie de arena fina.
filtro KANCHAN.**